

Numerische und experimentelle Untersuchungen zum mechanisch-  
drucktechnischen Verhalten von Offsetdrucktüchern unter besonderer  
Berücksichtigung ihrer hyper- und schaumelastischen Eigenschaften

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Aous Bouabid

aus Sousse, Tunesien

Berichtserstatter : Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam

Mitberichtserstatter : Prof. Dr.-Ing. P. Pelz

Tag der Einreichung : 14.01.2008

Tag der mündlichen Prüfung : 01.04.2008

Darmstadt 2008



### **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation, abgesehen von den ausdrücklich genannten Hilfen, selbstständig verfasst habe.

Darmstadt, im Januar 2008

Dipl.-Ing. Aous Bouabid





## Abstract

Nowadays, printed products are still highly appreciated as information and communication media, despite the rapid development of electronic media. The corresponding production machines, i. e. the printing machines, essentially use cylinders to transfer ink and transport paper as needed in the printing process, so that three-dimensional rolling contact problems have a central importance in printing machines. In the so-called offset printing process, first the ink has to be transferred to an intermediary cylinder with a rubber cover, called printing blanket. The ink transfer from the blanket to the paper occurs in a second step.

A printing blanket is a multi-layered thin structure. In general it consists of a covering rubber layer, an elastomeric foam layer and several orthotropic tissue layers (cotton). The covering layer is responsible for ink transfer. The elastomeric foam provides the blanket construction with a defined amount of compressibility. Finally, the tissue layers provide elastomeric layers with a higher tenacity and stabilise them against Relaxation. Aim of the present study is to predict the printing behaviour of a blanket on the base of its mechanical properties, using numerical simulation and experiment.

A finite element model taking account the different layers and materials of the blanket has first to be developed. For this aim, the different layers, which form the blanket, can be grouped into two categories: printing elements (i. e. covering and foam layer), mainly responsible for the printing function of the blanket, and structural elements (tissue layers), mainly having a stabilising function. Afterwards, each of the blanket materials has to be characterised on the base of elementary tests (tensile and stamp tests). The test results, i. e. a set of material parameters can be used to feed up the finite element model, in order to simulate the three-dimensional ink transfer process. The simulation results (contact pressure and slip in the cylinder contact zones) are verified by experiments, carried out on an offset printing machine. Selected pixels from printed pictures are surveyed and measured microscopically. In this way the slip, which occurred during the printing (rolling) process, can be experimentally determined and compared with the slip predicted by the finite element model.

Using the example of the offset blanket, the present work demonstrates how the mechanical and printing behaviour of complex structures can be examined numerically and experimentally. The principle of differentiating printing and structural layers,

which is the basis of the numerical simulation carried out in this work, allows the simplification of the complex construction of the blanket, so that time-dependent material behaviour, arising from the elastomeric layers on the one hand, and orthotropic material behaviour, arising from the tissue layers on the other hand, can be examined and identified separately. Hence, the numerical model presented here can be used as a basis for further examinations, investigating the viscous properties of blankets at high printing speed, for example.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlichen Mitarbeiters am Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Universität Darmstadt entstanden.

Ich möchte meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam, dem Fachgebietsleiter, für die großartige persönliche und fachliche Betreuung einen großartigen Dank aussprechen. Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Pelz möchte ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Korreferats danken.

Allen meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet danke ich für die kollegiale und fachliche Unterstützung, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ferner danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen an der TU Darmstadt, die mir bei Fragen aus angrenzenden Fachgebieten weitergeholfen haben, insbesondere denen des Fachgebiets Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik sowie des Hochschulrechenzentrums. Herrn M. Göttmann gebührt ein besonderer Dank für die mir gewidmete Zeit, Geduld und Ausdauer bei der Durchführung der anspruchsvollen Druckversuche.

Ein besonderer Dank gebührt ebenfalls den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Unternehmen ContiTech Elastomer-Beschichtungen, Druckchemie, Epple Druckfarben, Ernst Marks, FAG Graphic Systems, Felix Böttcher, Heidelberger Druckmaschinen, Koenig & Bauer, MAN Roland Druckmaschinen, Papier Union, PHOENIX Xtra PRINT, StoraEnso, Streb sowie Unisensor Sensorsysteme für die ausführlichen Gespräche zum Druckversuch und das freundliche, großzügige Sponsern der Versuchsmaterialien.

Meiner Familie gilt mein tiefer Dank für ihre Geduld und das an mich gesetzte Vertrauen.

Darmstadt, im Januar 2008

Dipl.-Ing. Aous Bouabid



## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
2	Grundlagen des Bogen-Offsetdrucks .....	3
2.1	Grundlegende Begriffe.....	3
2.2	Einteilung der Druckverfahren nach Druckform .....	4
2.3	Druckspannung .....	6
2.4	Druckprinzipien .....	7
2.5	Rasterbilder beim Einfarbendruck .....	9
2.6	Mehrfarbendruck.....	12
2.7	Offsetdruckverfahren .....	12
2.8	Offsetdruckmaschinen .....	15
2.9	Farbschichtdicke und Tonwert.....	17
2.10	Druckabwicklung .....	19
2.11	Gestaltung der Kontaktzonen.....	22
3	Stand der Technik und der Wissenschaft.....	23
3.1	Offsetdruck und Drucktuch heute .....	23
3.2	Drucktuchaufbau .....	24
3.3	Drucktucheigenschaften.....	26
3.4	Normen.....	29
3.5	Die klassischen Untersuchungen .....	29
3.5.1	Untersuchung der Farbübertragung von Drucktüchern .....	29
3.5.2	Messung der Druckverteilung zwischen Drucktuch und Papier.....	29
3.5.3	Drucktucheigenschaften und Marktübersicht .....	30
3.5.4	Messung der Zylinderkräfte zwischen Platten-, Gummi- und Druckzylinder.....	33
3.5.5	Messung der Bogen deformation beim Passieren der Kontaktzone Drucktuch-Bogen.....	33
3.5.6	Die „Vergleichenden Gummituch-Untersuchungen“ .....	34
3.5.7	Untersuchung der Bogenqualität und dynamischen Eigenschaften von Offsetpapier.....	35
3.5.8	Untersuchung der Drucktucheigenschaften und Druckqualität .....	36
3.6	Das „Gummituch-Symposium“ .....	37
3.6.1	Untersuchung der Druckabwicklung .....	38

3.6.2	Prüfmethoden für Drucktücher .....	39
3.6.3	Drucktücher und Praxiserfahrungen .....	40
3.6.4	Eigenschaften von Drucktüchern für den Rollenoffset.....	40
3.6.5	Berechnungsmodell nach Stöckel .....	40
3.6.6	Optimale Druckabwicklung .....	41
3.6.7	Drucktuchaufbau und Beurteilungskriterien .....	41
3.6.8	Abschätzung der Druckspannung .....	41
3.6.9	Einfluss des Waschmittels .....	42
3.6.10	Entwicklungstendenzen von Drucktüchern .....	42
3.7	Abrollvorgänge und Materialmodelle .....	42
3.7.1	Allgemeine Walzenkontakte bei Gummielastizität.....	42
3.7.2	Viskoelastische Walzenkontakte bei Druckmaschinen nach Pfeiffer und Glück.....	43
3.7.3	Das „erste“ Materialmodell für Drucktücher .....	43
3.7.4	Millersche Bedingungen .....	46
3.7.5	Untersuchung zum True Rolling.....	47
3.7.6	Förderverhalten .....	48
3.8	Numerische Lösungsverfahren, Simulation .....	49
3.8.1	Berechnung des Abrollvorgangs mit durchgehender Papierbahn.....	49
3.8.2	Berechnung des Abrollvorgangs bei Walzen mit geschichtetem Bezug mit der Randelement-Methode (BEM).....	49
3.8.3	Berechnung des Abrollvorgangs mit Berücksichtigung der Druckfarbeigenschaften mit der Randelement-Methode .....	50
3.8.4	Lösung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) .....	50
3.9	Thermomechanische Eigenschaften von Drucktüchern.....	52
3.10	Hyper- und Schaumelastizität .....	52
3.10.1	Phänomenologische hyperelastische Materialmodelle .....	52
3.10.2	Hyperelastisches Materialmodell bei Anisotropie .....	53
3.10.3	Makromolekular basierte hyperelastische Materialmodelle .....	53
3.10.4	Schaumelastische Materialmodelle.....	53
3.11	Stempelproblem .....	54
3.12	Mikroskopische Rastervermessung.....	54
3.13	Fazit.....	54

4	Motivation, Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	57
4.1	Motivation.....	57
4.2	Zielsetzung.....	57
4.3	Aufgabenstellung.....	57
4.4	Drucktuchauswahl.....	58
4.5	Richtungs- und Ebenenbezeichnungen.....	59
5	Finite-Element-Simulation des mechanisch-drucktechnischen Drucktuchverhaltens .....	61
5.1	Übergeordnetes Konzept.....	61
5.2	Vorgehensweise.....	63
5.3	Modellbildung.....	63
5.4	Identifikation der Materialparameter.....	64
5.4.1	Kraft-Verformungsverhalten der Drucktuchebene.....	65
5.4.2	Dehnung im Montagezustand.....	67
5.4.3	E-Modul in Drucktuchebene.....	68
5.4.4	Schubmodul in Drucktuchebene.....	69
5.4.5	Elastizität in Dickenrichtung.....	73
5.4.6	Materialmodell für die Drucktuchdicke bei den kompressiblen Drucktüchern.....	77
5.4.7	Materialmodell für die Drucktuchdicke beim inkompressiblen Drucktuch.. .....	81
5.4.8	Dynamisches Materialverhalten.....	83
5.5	Finite-Element-Modell.....	86
5.6	Herleitung homogenisierter Materialparameter.....	89
5.6.1	Elastizitätsmodul in Kettrichtung ( $E_1$ ).....	90
5.6.2	Elastizitätsmodul in Schussrichtung ( $E_2$ ).....	90
5.6.3	Elastizitätsmodul in Druckdickenrichtung ( $E_3$ ).....	91
5.6.4	Querdehnzahl in Drucktuchebene ( $\nu_{12}$ ).....	91
5.6.5	Transversale Querdehnzahl ( $\nu_{13}$ ).....	93
5.6.6	Bedingungen für Kontraktionsfreiheit in Dickenrichtung.....	94
5.6.7	Transversale Querdehnzahl ( $\nu_{23}$ ).....	95
5.6.8	Schubmodul in Drucktuchebene ( $G_{12}$ ).....	95
5.6.9	Transversaler Schubmodul ( $G_{13}$ ).....	96

5.6.10 Transversaler Schubmodul ( $G_{23}$ ) .....	97
5.6.11 Homogenisierung mit der Finite-Element-Methode .....	97
5.6.12 Stabilisierende Wirkung der Gewebeschichten .....	99
5.6.13 Vergleich des homogenisierten Rebar-Modells mit dem Modell nach Michel .....	101
5.7 Dreidimensionale Simulation des Abrollvorgangs .....	102
5.7.1 Modellierung des rollenden Kontakts zwischen Druckplatte und Drucktuch.....	102
5.7.2 Berechnungsparallelisierung.....	104
5.7.3 Einfluss des Durchmesserhältnisses .....	105
5.7.4 Einfluss des Drucktuchaufbaus.....	107
5.7.5 Spannung in der Stabilisierungsschicht (Rebar-Spannung).....	108
6 Experimentelle Untersuchung.....	111
6.1 Versuchskonzept.....	111
6.1.1 Vorversuch.....	111
6.1.2 Justage-Versuch .....	112
6.1.3 Testprogramm .....	112
6.2 Versuchsraum.....	112
6.2.1 Versuchsparameter.....	112
6.2.2 V-Diagramm .....	113
6.2.3 Trapez-Diagramm für Schmitzringläufer.....	114
6.3 Versuchsvarianten.....	117
6.3.1 Abwickelverhältnisse .....	117
6.3.2 Druckgeschwindigkeit .....	118
6.3.3 Drucktücher.....	118
6.4 Versuchsmaschine.....	119
6.5 Versuchsdruckplatte.....	120
6.6 Druckfarbe und Versuchspapier.....	121
6.7 Versuchsdurchführung .....	121
7 Versuchsauswertung .....	125
7.1 Vorgehensweise .....	125
7.2 Auswertungskenngrößen.....	125
7.3 Densitometrische Versuchsauswertung .....	126



7.3.1	Messeinrichtung .....	126
7.3.2	Feucht- und Farbwerk-Justage .....	127
7.3.3	Auswertungsstellen .....	128
7.3.4	Klimatische Bedingungen .....	128
7.3.5	Vergleichsdruck .....	129
7.4	Mikroskopische Versuchsauswertung .....	130
7.4.1	Messeinrichtung .....	130
7.4.2	Bildanalyse und Rasterpunktvermessung .....	131
7.4.3	Mikroskopieren auf der Druckplatte .....	132
7.4.4	Mikroskopieren auf den Bogen .....	132
7.4.5	Einfluss der Drucktuchoberfläche .....	133
7.4.6	Einfluss des Drucktuchaufbaus .....	134
7.4.7	Einfluss der Abwickelverhältnisse .....	134
7.4.8	Einfluss der Druckzylinderbeistellung .....	136
7.4.9	Einfluss der Druckgeschwindigkeit .....	136
7.4.10	Einfluss der Papierlaufrichtung .....	137
7.4.11	Einfluss der Farbdichte .....	138
8	Gegenüberstellung der Simulations- und Versuchsergebnisse .....	141
8.1	Nachrechnung elementarer Belastungsfälle .....	141
8.1.1	Nachrechnung des Zugversuchs .....	141
8.1.2	Nachrechnung des Stempelversuchs .....	143
8.1.3	Nachrechnung des Abrollversuchs (Rollenprüfstand) .....	145
8.1.4	Fazit .....	146
8.2	Vergleich der Ergebnisse aus Abrollsimulation und Druckversuchsreihe .....	147
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	151
10	Literaturverzeichnis .....	155
11	Anhang .....	165
11.1	Geometrische und mechanische Eigenschaften von Drucktüchern (Herstellerangaben) .....	165
11.2	Quasistatische Materialkennwerte für die Abrollsimulation .....	166
11.2.1	Gewebeschichten .....	166
11.2.2	Luftpolsterschichten .....	166
11.2.3	Deckschichten .....	166

11.3 Ermittlung der Dehnsteifigkeiten beim homogenisierten Rebar-Modell.....	167
11.3.1 Reduzierte Steifigkeiten $Q_{ij}$ einzelner Schichten .....	167
11.3.2 Dehnsteifigkeiten $A_{ij}$ des gesamten Drucktuchaufbaus .....	167
11.3.3 Querdehnzahlen $\nu_{12}$ und $\nu_{13}$ und Schubmodul $G_{12}$ des gesamten Drucktuchaufbaus .....	167
11.4 Wesentliche Merkmale und Materialparameter zum Rebar-Modell.....	171
11.5 Typische Prozessparameter für Feucht- und Farbwerkjustage .....	172
11.6 Justage-Druckplatte.....	173
11.7 Testdruckform.....	174
11.8 Rasterpunktvermessung mit der Software Matlab .....	175
11.8.1 Algorithmus .....	175
11.8.2 Quellcode .....	176

## Formelzeichen

$\bar{G}$	[MPa]	Mittelwert des Schubmoduls
[D]	[MPa]	Werkstofftangentialmatrix
[S]	[MPa <sup>-1</sup> ]	Nachgiebigkeitsmatrix
[T]	[-]	Transformationsmatrix
$\mu_H$	[-]	Haftreibungszahl
$\mu_i$	[MPa]	Konstante
A	[ $\mu\text{m}^2$ ]	Fläche
$a_0$	[mm]	Kontaktlänge
$A_{ij}$	[N/mm]	Dehnsteifigkeit des gesamten Drucktuchaufbaus
B	[mm]	Breite
C	[-]	Linker Cauchy-Green-Verzerrungstensor
$C_{01}$	[MPa]	Konstante
$C_{10}$	[MPa]	Konstante
$D_1$	[MPa <sup>-1</sup> ]	Konstante
$D_R$	[-]	Farbdichte im Raster
$D_V$	[-]	Farbdichte im Vollton
$\mathcal{E}$	[‰]	Faktor zur relativen Änderung der Drucktuch-Umfangslänge
e	[-]	Orthotropiefaktor
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
$E_{GZ}$	[mm]	Gummizylindereinstich
$E_i$	[MPa]	Elastizitätsmodul in i-Richtung
$E_{PZ}$	[mm]	Platenzylindereinstich
F	[N]	Kraft
F	[-]	Deformationsgradient
f	[N/mm]	Linienkraft
$F_{\text{Druck}}$	[%]	Flächendeckung im Druck
$F_{\text{Soll}}$	[%]	Soll-Flächendeckung
g	[-]	Schubfaktor
G	[MPa]	Schubmodul
$G_{ij}$	[MPa]	Schubmodul in ij-Ebene
H	[mm]	Schalendicke

I	[-]	Erste Invariante des linken Cauchy-Green-Verzerrungstensors
II	[-]	Zweite Invariante des linken Cauchy-Green-Verzerrungstensors
J	[-]	Jakobi-Determinante
K	[-]	Konstante
L	[mm]	Charakteristische Schalenlänge
$Le_p$	[%]	Verhältnis aus reflektierter und gesendeter Lichtmenge an einer bedruckten Stelle
$Le_w$	[%]	Verhältnis aus reflektierter gesendeter Lichtmenge an einer nicht bedruckten Stelle (Referenzweiß)
$L_x$	[ $\mu\text{m}$ ]	Rasterpunktlänge
$L_y$	[ $\mu\text{m}$ ]	Rasterpunktbreite
N	[N]	Normalkraft
$N_{ij}$	[N/mm]	Schnittkraft
$\varnothing_{BS}$	[mm]	Außendurchmesser des um den Druckzylinder geführten Bedruckstoffs
$\varnothing_{DP}$	[mm]	Außendurchmesser der montierten Druckplatte
$\varnothing_{DT}$	[mm]	Außendurchmesser des montierten Drucktuchs
$\varnothing_{SR}$	[mm]	Schmitzringdurchmesser
$Q_{ij}$	[MPa]	Reduzierte Steifigkeit einzelner Drucktuchschichten
R	[mm]	Radius
s	[mm]	Eindrückung
$s_B$	[mm]	Eindrückung Druckbogen-Drucktuch
$s_P$	[mm]	Eindrückung Druckplatte-Drucktuch
T	[MPa]	Nominelle Spannung
$t_B$	[mm]	Druckbogendicke
$t_{DP}$	[mm]	Druckplattendicke
$t_{DPU}$	[mm]	Dicke der Druckplattenunterlegbogen
$t_{DS}$	[mm]	Dicke der Deckschicht
$t_{DT}$	[mm]	Dicke des gesamten Drucktuchs
$t_{DTU}$	[mm]	Dicke der Drucktuchunterlegbogen
$t_{FEST}$	[mm]	Dicke der Festigkeitsschicht

$t_{FS}$	[ $\mu\text{m}$ ]	Farbschichtdicke
$t_{LP}$	[mm]	Dicke der Luftposterschicht
$t_{STAB}$	[mm]	Dicke der Stabilisierungsschicht
$U$	[ $\mu\text{m}$ ]	Umfang (eines Rasterpunkts)
$U$	[MPa]	Verzerrungsenergiefunktion
$u$	[mm]	Verschiebung
$\ddot{U}_{DP}$	[mm]	Druckplattenüberstand
$\ddot{U}_{DT}$	[mm]	Drucktuchüberstand
$V_{DT-BS}$	[-]	Verhältnis aus Drucktuch- und Bedruckstoffumfangslänge
$V_{DT-DP}$	[-]	Verhältnis aus Drucktuch- und Druckplattenumfangslänge
$X_{20}$	[X]	Mittelwert einer Kenngröße X aus 20 Messungen
$Z$	[%]	Tonwertzunahme
$\Delta$	[mm]	Druckzylinderbeistellung
$\Delta G$	[MPa]	Schätzfehler des Schubmoduls
$N$	[-]	Grad der Verzerrungsenergiefunktion
$\Pi$	[-]	Ausgleichspolynom
$\alpha_i$	[-]	Konstante
$\beta$	[-]	Remissionsgrad
$\beta_i$	[-]	Konstante
$\delta\omega$	[%]	Relative Winkelgeschwindigkeitsänderung des Gummizylinders.
$\varepsilon$	[-]	Dehnung
$\varphi$	[%]	Flächendeckung
$\kappa$	[ $\mu\text{m}$ ]	Verhältnis aus Umfang und Fläche
$\lambda$	[-]	Schalenparameter
$\lambda_i$	[-]	Streckung in i-Richtung
$\nu$	[-]	Querdehnzahl
$\nu_{ij}$	[-]	Querdehnzahl (i: Belastungs-, j: Kontraktionsrichtung)
$\nu_{trans}$	[-]	Querdehnzahl in Transversalebene
$\rho$	[-]	Rundheit
$\sigma$	[MPa]	Spannung
$\tau$	[s]	Zeit



**Abkürzungen**

BEM	Randelement-Methode (Boundary Element Methode)
BS	Bedruckstoff
DP	Druckplatte
DS	Deckschicht
DT	Drucktuch
FEM	Finite-Element-Methode
FEST	Festigkeitsschicht
KF	Kontraktionsfrei
LP	Luftpolsterschicht
STAB	Stabilisierungsschicht
UV	Ultraviolett





## 1 Einführung

Die gedruckte Information stellt trotz der in den letzten Jahrzehnten verzeichneten rasanten Entwicklung elektronischer Medien einen Informationsweg mit vielen Vorzügen dar. Ob als Zeitung für unterwegs, Grußkarte für besondere Anlässe, Faltblatt zur schnellen, umfassenden Information oder jederzeit zum Nachschlagen parat stehendes Buch stehen gedruckte Sachen nach wie vor für ein im Inhalt reichliches, in der Form divers gestaltbares, in der Darreichungsart greifbares, in der Anwendung unkompliziertes und in der Zielsetzung informatives, ja unterhaltendes und begeistertes Medium.

Die Vielfalt der Druckprodukte sorgte auf produktionstechnischer Seite für eine entsprechende Vielfalt an Produktionsmaschinen, also Druckmaschinen, die mit der Zeit ständige Weiterentwicklungen hinsichtlich Größe, Bauweise, Leistungsspektrum und nicht zuletzt Druckgeschwindigkeit erfahren haben.

Bei der Optimierung von Druckmaschinenkomponenten bezüglich Funktion und Werkstoff werden hauptsächlich rechnerische und experimentelle Verfahren eingesetzt. Die vorliegende Arbeit ist vor dem Hintergrund entstanden, die Berechnungs- und Versuchsgrundlagen für Druckmaschinen zu erweitern. Am Beispiel eines komplexen elastomeren Zylinderbezugs, des so genannten Drucktuchs, wird untersucht, wie auf der Basis einer modellhaften Betrachtung von Werkstoff und Zusammensetzung des Bauteils das Betriebsverhalten desselben vorausgesagt werden kann.

Die Untersuchung besteht aus einem Berechnungs- und einem experimentellen Teil. Im ersten Teil erfolgt die Bauteilmodellierung mithilfe der Methode der finiten Elemente. Die mechanischen Bauteileigenschaften werden dabei identifiziert und experimentell charakterisiert, mit dem Ziel, anschließend das Bauteilverhalten während des Druckprozesses rechnerisch zu erfassen. Der experimentelle Teil beinhaltet eine Reihe von Druckversuchen, mit denen die Ergebnisse der numerischen Simulation verifiziert werden.

Eine kurze Übersicht über die Grundlagen von Druckmaschinen und -verfahren ist in Kapitel 2 gegeben. Kapitel 3 stellt den Stand der Technik und der Wissenschaft im Hinblick auf die mechanisch-drucktechnischen Eigenschaften von Drucktüchern dar. Die Präzisierung der Aufgabenstellung folgt in Kapitel 4. Kapitel 5 ist der numerischen Simulation gewidmet. Dort erfolgen die Erstellung eines Finite-Element-Modells für das Drucktuch, die Festlegung geeigneter Materialmodelle, die experi-

mentelle Charakterisierung der Materialparameter und der Einsatz des Drucktuchmodells zur Simulation des Druckvorgangs. Der experimentelle Aufgabenteil beinhaltet Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung und wird in den Kapiteln 6 und 7 behandelt. In Kapitel 8 folgt anschließend eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem rechnerischen und dem experimentellen Aufgabenteil, ehe die Arbeit durch eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und einen Ausblick über weiterführende Untersuchungen abgerundet wird.

## 2 Grundlagen des Bogen-Offsetdrucks

### 2.1 Grundlegende Begriffe

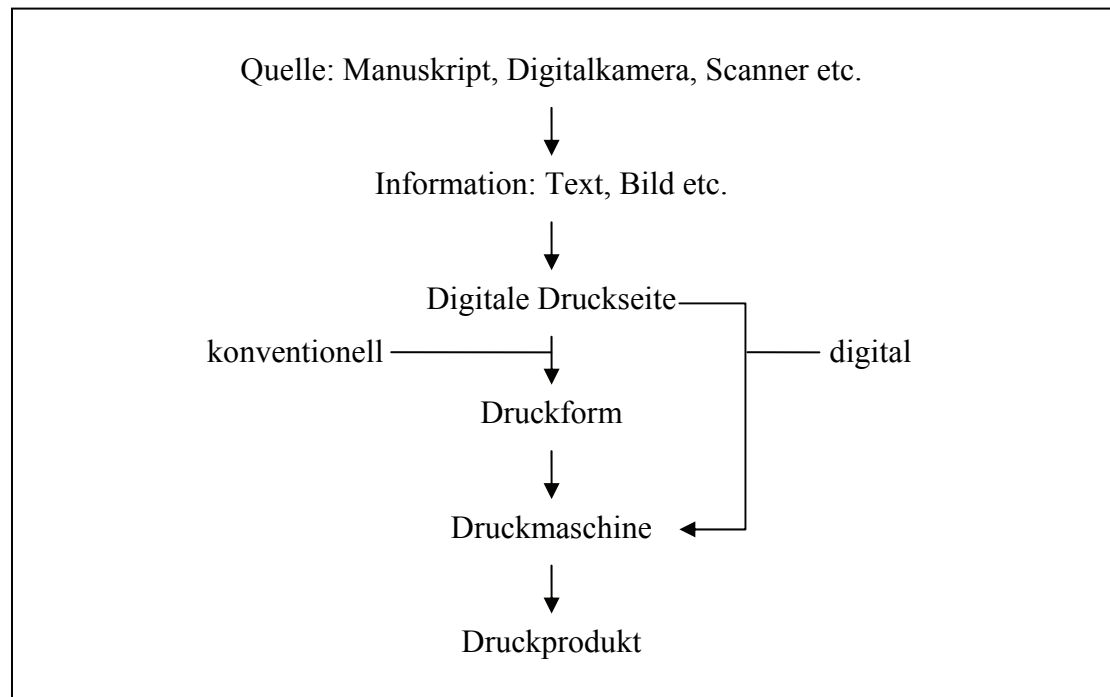
Unter Drucken wird im Allgemeinen die Informationsvermittlung durch Übertragung von färbenden Substanzen auf einen Bedruckstoff verstanden [BRO05]. Informationen können z. B. Text oder Bilder sein. Zum Bedruckstoff gehören neben Papier beispielsweise auch Wellpappe, Glasscheiben, Kunststoffschalen und Blechtafeln. Färbende Substanzen sind z. B. Druckfarben, die je nach Einsatzgebiet unterschiedliche chemische Zusammensetzungen haben. Als Druckprodukt wird ein Gegenstand bezeichnet, der in gedruckter Form vorliegt, also z. B. eine Zeitung, ein Etikett oder ein Poster. Für die Aufbringung einer färbenden Substanz auf einen Bedruckstoff bieten sich mehrere Lösungen an. Dies kann z. B. durch eine mechanische Druckkraft oder berührungslos über einen Tintenstrahl erfolgen. Das Wirkprinzip, nach dem das Drucken erfolgt, wird als Druckverfahren bezeichnet. Die Druckmaschine ist der Raum, in dem dieses Wirkprinzip konstruktiv verwirklicht wird.

Druckprodukte gehören zum Alltag und haben unterschiedliche Zwecke zu erfüllen. So unterschiedlich sind auch die Anforderungen, die an sie gestellt werden, wie z. B. Format, Qualität, Kosten, Auflagenhöhe oder Herstellungszeit. So liegt es auch nah, dass es ein universelles Druckverfahren, das allen Anforderungen gleichzeitig gerecht wird, nicht gibt. Eine Zeitschrift, die regelmäßig für einen breiten Leserkreis mit ständig neuen Informationen und in einer visuell ansprechenden Form erscheint, wird nach einem anderen Druckverfahren hergestellt, als ein einmalig erscheinendes Fachbuch, das sich einem engen Fachkreis widmet und bei dem das Inhaltliche dem Visuellen vorgeht.

Die Anzahl heutiger Druckverfahren ist groß. Diese werden in konventionelle und digitale Verfahren eingeteilt, Abbildung 2.1. Erste sind die ältesten, haben sich über die Jahrhunderte hinweg entwickelt und besitzen heute die größte industrielle Bedeutung. Zwar erfuhren sie in der letzten Zeit dank der fortschreitenden digitalen Technik starke Vereinfachungen in ihrer Gestaltung, ihr Wirkprinzip blieb jedoch erhalten. Nichtkonventionelle Druckverfahren sind jüngeren Alters. Sie entstanden Mitte des 20. Jahrhunderts und nutzen durchgängig digitalisierte Prozesse. Sie werden deshalb als digitale Druckverfahren bezeichnet, zu denen der Tintenstrahldruck und die Elektrofotografie gehören.

## 2.2 Einteilung der Druckverfahren nach Druckform

Der Übergang von der immateriellen Informationen zum fassbaren Druckprodukt ist ein hochkomplexer Prozess, Abbildung 2.1.



**Abbildung 2.1:** Prozesskette bei der Herstellung von Druckprodukten. Die Informationsbeschaffung und -verarbeitung erfolgt heutzutage überwiegend digital. Druckverfahren werden in konventionelle und digitale Verfahren eingeteilt, je nachdem, ob die digitale Druckseite direkt oder über eine Druckform gedruckt wird. Dem Drucken schließt sich meistens eine Weiterverarbeitung an, die z. B. durch Schneiden, Falzen und Heften zum fertigen Druckprodukt (Broschüre, Buch, Verpackung u. a.) führen [KIP00].

Die Informationen stammen meistens aus verschiedenen Quellen. Sie werden z. B. entsprechend einem Manuskript in den Rechner eingegeben oder aus Originalen mithilfe einer Digitalkamera oder eines Scanners gewonnen. Im Rechner werden alle erfassten Daten verarbeitet und nach einem bestimmten Layout zu einer Druckseite zusammengefügt. Sind digitale Druckverfahren in der Lage, direkt aus dem digitalen Datenbestand zu drucken, so benötigen konventionelle Druckverfahren eine so genannte Druckform, auf die die Druckseite zunächst abgebildet wird. Die Druckform wird in einem separaten Arbeitsgang hergestellt und erst dann in die Druckmaschine montiert. Sie wird beim Drucken eingefärbt und sorgt dafür, dass die Druckfarbe nur an ganz definierten Stellen übertragen wird, nämlich an den schrift- bzw. bildbehafteten Stellen. Es sind also zwei Bereiche zu unterscheiden, die druckenden und die

nichtdruckenden Stellen, wie dies in Abbildung 2.2 am Beispiel einer rein textuellen Druckform dargestellt ist. Erste dürfen beim Einfärben die Druckfarbe aufnehmen, letzte jedoch nicht, sie bilden den Hintergrund.



**Abbildung 2.2:** Bestandteile einer rein textuellen Druckform. Druckende Stellen (Schrift) dürfen beim Einfärben die Druckfarbe aufnehmen, um sie später auf den Bedruckstoff zu übertragen. Nichtdruckende bleiben dagegen farbfrei. Wie die Druckform nun zwischen Druckendem und Nichtdruckendem unterscheidet, hängt von dem jeweiligen Druckverfahren ab.

Je nachdem, wie die Druckform zwischen Druckendem und Nichtdruckendem unterscheidet, werden die konventionellen Druckverfahren in die Hauptdruckverfahren Hoch-, Tief-, Durch- und Flachdruck weiter unterteilt. Jedes von diesen Verfahren lässt sich wiederum in eine Anzahl von Verfahren spezifizieren, je nachdem wie es konstruktiv umgesetzt wird.

Beim Hochdruck wird die Druckform so aufgebaut, dass die druckenden Stellen aus der Ebene der Druckform herausragen (daher Hochdruck genannt), sodass die Druckfarbe beim Einfärben nur zu den höher gelegten Stellen gelangt. Typisches Beispiel dafür ist der Buchdruck, wie er im 15. Jahrhundert von Gutenberg erfunden wurde und heute z. B. beim Stempel vertreten ist. Die zu druckende Schrift wird dabei in die weiche Stempelgrundfläche in Form von erhabenen Lettern eingearbeitet. Im Stempelkissen werden nur die Lettern eingefärbt, um danach auf Papier übertragen zu werden.

Der Tiefdruck basiert auf dem gleichen Wirkprinzip wie der Hochdruck, mit dem Unterschied, dass die druckenden Stellen diesmal tiefer sitzen als die nichtdruckenden.

Wird die Druckfarbe in Kontakt mit der Druckform gebracht (z. B. durch Abrakeln), so füllen sich die druckenden Stellen mit Druckfarbe auf. Ein Beispiel für den Tiefdruck ist der Stahlstich, bei dem die zu druckende Information in einen Stahlkörper eingraviert wird, wie dies z. B. zum Drucken von Briefmarken eingesetzt wird.

Beim Durchdruck werden die druckenden Stellen aus der Druckform vollständig herausgelöst. Die Druckform erlangt dadurch eine siebähnliche Struktur, die die Druckfarbe nur an den druckenden Stellen zum Bedruckstoff gelangen lässt. Dieses Verfahren findet Anwendung z. B. beim Drucken auf textile Stoffe.

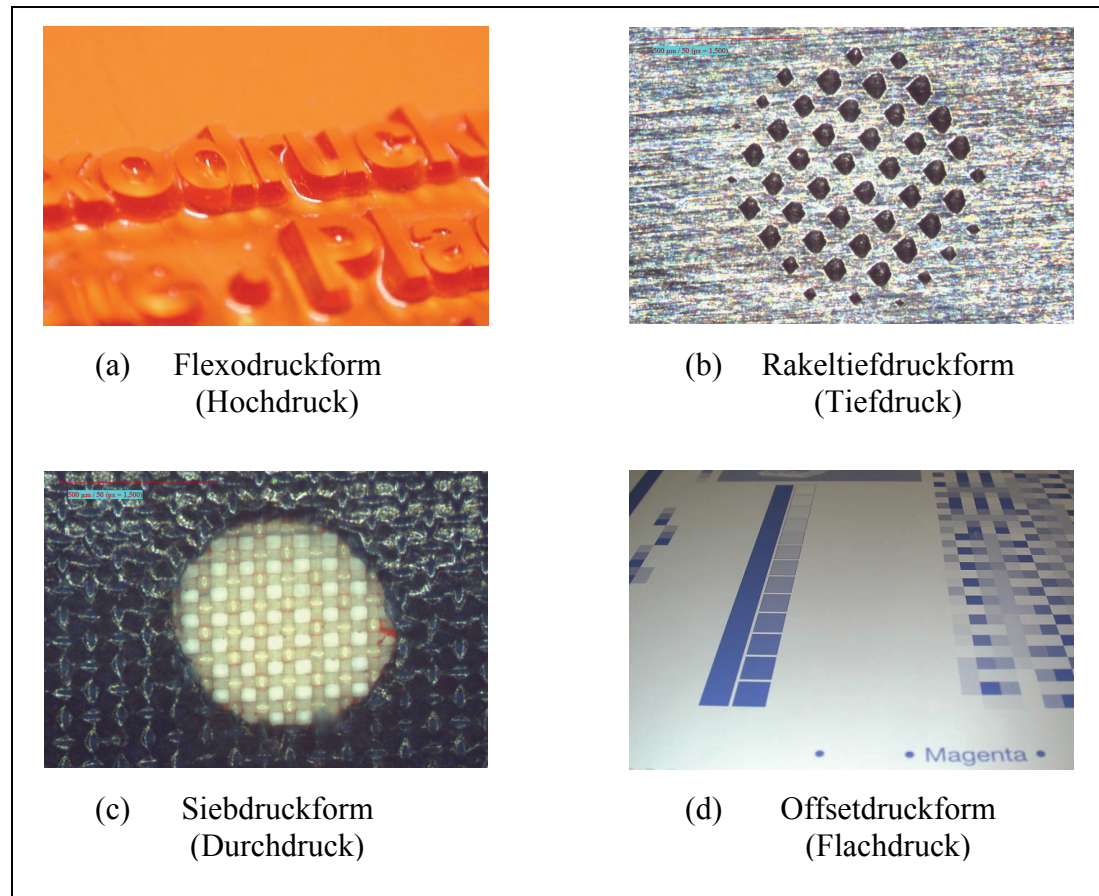
Beim Flachdruck wird die zu druckende Information auf die Druckform derart kopiert, dass Druckendes und Nichtdruckendes auf einer Ebene liegen (daher Flachdruck genannt). Sie haben jedoch unterschiedliches chemisches Verhalten hinsichtlich der Farbaffinität. Druckende Stellen sind farbfreundlich und nehmen beim Einfärben Druckfarbe auf, die nichtdruckenden dagegen stoßen die Druckfarbe von sich ab und bleiben farbfrei. Dieses Verfahren zeichnet sich im Vergleich zu den anderen Verfahren u. a. durch die einfachere Druckformherstellung aus. Zu ihm gehört der so genannte Offsetdruck, der seit den 70er Jahren große Erfolge hinsichtlich Druckqualität und Produktivität verzeichnen konnte und sich weltweit bei der Herstellung von Druckprodukten, insbesondere Büchern, Prospekten, Zeitungen, Etiketten und Postern, einen Anteil von etwa 50% sichern konnte. Er ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Abbildung 2.3 zeigt für die Hauptdruckverfahren jeweils ein Beispiel für den Druckformaufbau.

### 2.3 Druckspannung

Nach der Einfärbung der Druckform wird die Druckfarbe bei den konventionellen Druckverfahren auf den Bedruckstoff unter Zuhilfenahme einer Druckspannung übertragen. Am Beispiel des oben eingeführten Stempels erfolgt dies durch „Abstempeln“. Druckform, -farbe, -spannung und Bedruckstoff bilden die vier Elemente des Druckprozesses.

Beim Hochdruck erforderte eine vollständige Übertragung der Druckfarbe von den erhabenen Lettern zum Bedruckstoff eine hohe Druckspannung, die dazu geführt hatte, dass sich erhabene Lettern in den Bedruckstoff einprägen. Deshalb werden heute entweder eine weiche (z. B. Gummi) oder auch eine harte Druckform eingesetzt, die allerdings zunächst auf einen weichen Zwischenträger und von dort aus auf den Be-

druckstoff druckt. Die zweite Alternative wird als indirektes Drucken bezeichnet und hat den Vorteil einer besseren Farbübertragung und einer geringeren Maschinenbelastung infolge geringer Druckspannungen. Einmal übertragen liegt die Druckfarbe auf den Bedruckstoff als eine dünne Schicht vor. Die Farbschichtdicke beträgt beim Offsetdruck typisch  $0,7\text{ }\mu\text{m}$ .

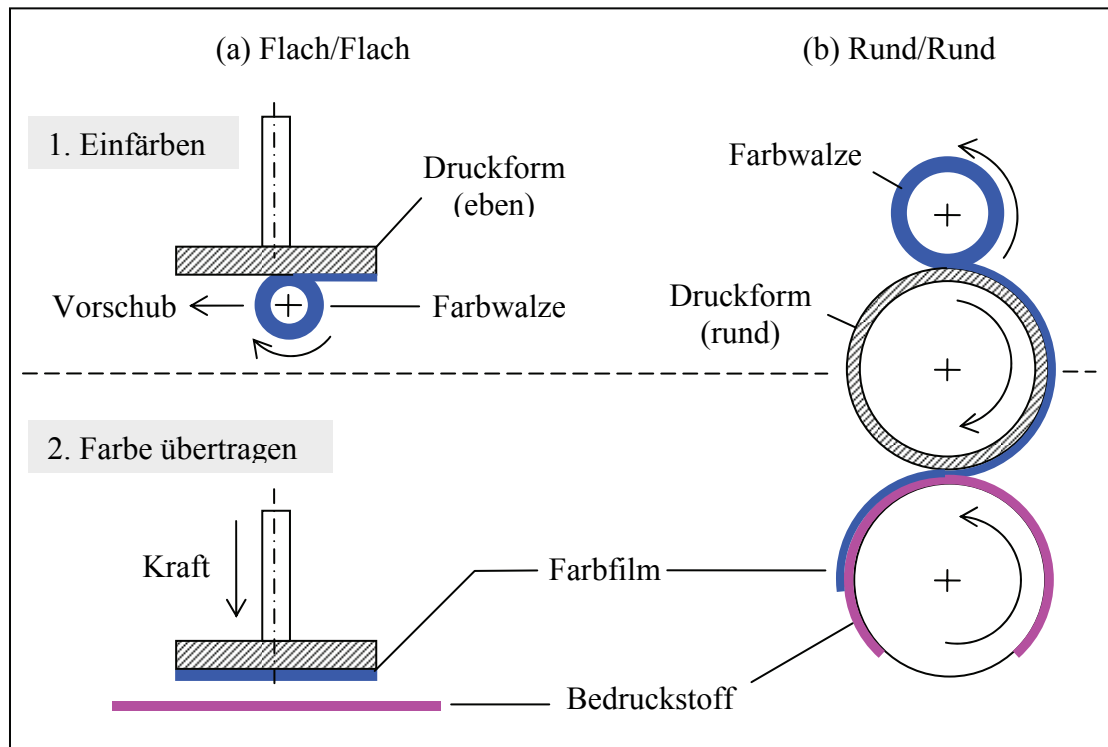


**Abbildung 2.3:** Druckformen für die Hauptdruckverfahren. (a) Flexodruck: Hochdruckform aus polymerem Material (b) Tiefdruck: Mikroskopische Aufnahme eines  $0,5\text{ mm}$  großen, aus mehreren farbannehmenden Nöpfchen bestehenden Punktes (ca.  $50\text{ }\mu\text{m}$  groß und  $1\text{ }\mu\text{m}$  tief) (c) Durchdruck: Abbildung eines  $0,5\text{ mm}$  großen Punktes auf einer Siebdruckform. Außerhalb des Punktes ist der nichtdruckende Bereich dicht. (d) Offsetdruck: Druckende und nichtdruckende Stellen liegen bei einer Offsetdruckform auf einer Ebene. Sie unterscheiden sich durch ihr Farbaffinität.

## 2.4 Druckprinzipien

Drucken wird als periodischer Vorgang gestaltet. Dies resultiert aus der Anforderung, dass durch Drucken Informationen in beliebiger Anzahl und gleicher Qualität vervielfältigt werden sollen. Diese Periodizität lässt sich konstruktiv auf verschiedenen Wegen lösen, woraus – unabhängig von dem zugrunde liegenden Druckverfahren – ver-

schiedene Druckprinzipien resultieren, von denen zwei Beispiele in Abbildung 2.4 dargestellt sind.



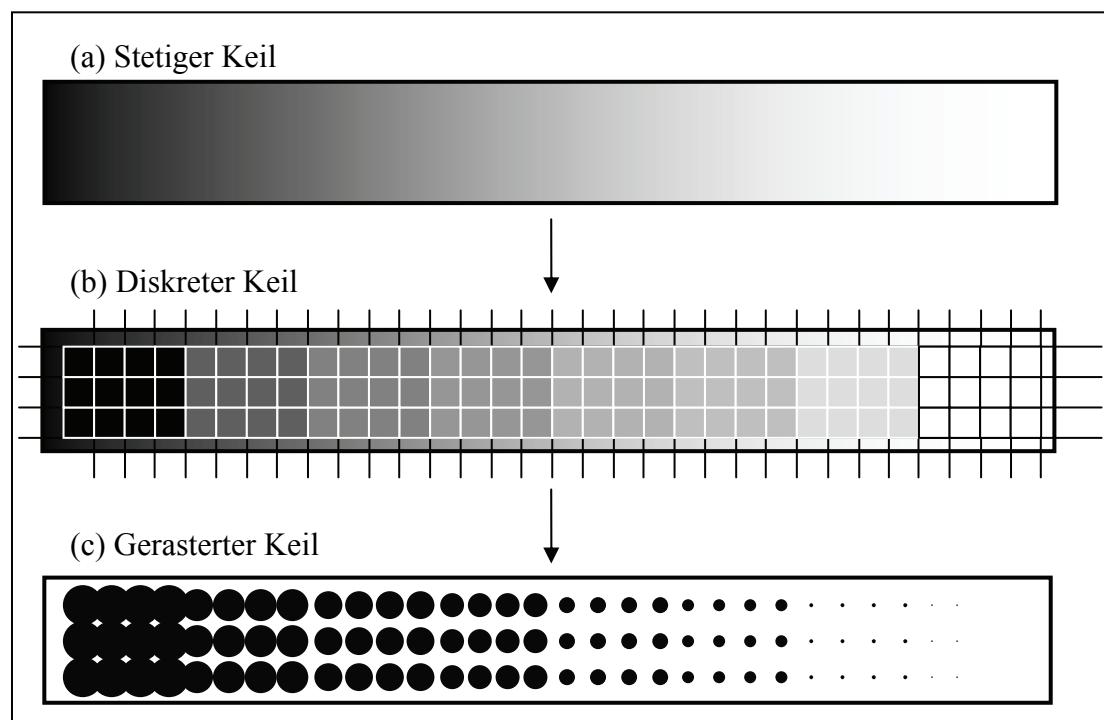
**Abbildung 2.4:** Druckprinzipien. (a) Das Flach-Flach-Druckprinzip ist rein translatorisch, war früher bei den Handpressen im Einsatz und hat heute kaum noch Bedeutung. (b) Das Rund-Rund-Druckprinzip ersetzt die unterbrochene Hubbewegung durch einen schnelleren kontinuierlichen Abrollvorgang, bei dem Einfärben und Drucken gleichzeitig vonstattengehen, und ist heute die Basis aller Offsetdruckmaschinen.

Beim Flach-Flach-Druckprinzip ist die Druckform eben. Sie wird nach dem Einfärben translatorisch gegen den ebenfalls auf einer Ebene liegenden Bedruckstoff gepresst, überträgt somit die Druckfarbe und rückt dann wieder zurück. Als höhere Druckgeschwindigkeiten gefragt wurden, wurde im Laufe des 19. Jahrhunderts von dem Flach-Flach- zum Rund-Rund-Druckprinzip übergegangen, bei dem sowohl die Druckform als auch der Bedruckstoff in ein Zylindersystem aufgenommen werden. Druckmaschinen, die auf dem Rund-Rund-Druckprinzip basieren, werden Rotationsdruckmaschinen genannt, zu denen Offsetdruckmaschinen gehören. Diese basieren hauptsächlich auf Abrollvorgängen und nutzen sowohl metallische als auch weiche polymere Walzen, um u. a. die Druckfarbe aufzubereiten, die Druckform einzufärben, den Bedruckstoff zu transportieren und die Druckfarbe auf den Bedruckstoff zu übertragen. Für einen einwandfreien Druck ist die korrekte Auslegung aller am Abrollvorgang beteiligten Elemente von fundamentaler Bedeutung.



## 2.5 Rasterbilder beim Einfarbendruck

Druckend oder Nichtdruckend ist an sich eine diskrete Unterscheidung, die lediglich zwei Zustände beschreiben kann, nämlich, ob Farbe oder keine Farbe auf den Bedruckstoff übertragen wird. Liegt ein Bild vor, das verschiedene Nuancen der einen und derselben Farbe (sogenanntes Halbtonbild) ausdrücken soll, so lässt es sich drucktechnisch über mehrere Wege reproduzieren. So kann durch eine stetig verlaufende Farbschicht mit variabler Dicke dafür gesorgt werden, dass Bildstellen unterschiedlich dunkel erscheinen. Die Steuerung der Farbschichtdicke ist jedoch nur begrenzt möglich und wird z. B. beim Tiefdruck durch unterschiedlich tiefe Näpfchen verwirklicht. Beim Offsetdruck wird vielmehr versucht, Halbtöne über diskrete Verfahren (Rasterverfahren) zu reproduzieren, Abbildung 2.5.



**Abbildung 2.5:** Drucktechnische Abbildung eines kontinuierlichen Halbtonkeils. (a) Beim stetigen Keil verläuft die Farbe von ihrem vollen Ton bis zum Weißen stetig (ohne Sprünge.) (b) Der diskrete Keil entsteht dadurch, dass der stetige Keil in lauter kleine Rasterzellen eingeteilt wird. (c) Ein Halbton wird beim gerasterten Keil dadurch reproduziert, dass der gesamte „Farbgehalt“ einer Rasterzelle in einem einzigen Rasterpunkt konzentriert wird, der zwar den vollen Farbton hat, jedoch die Rasterzelle nur teilweise bedeckt.

Ein stetiger Verlauf von Schwarz (oder jeder anderen monochromen Farbe) nach Weiß lässt sich anhand eines gedachten, darüber gelegten Netzes in kleine quadratische Zellen teilen. In jeder Zelle wird der Halbton gemittelt, sodass zellenweise konstante

Halbtöne resultieren, die den stetigen Halbtonkeil in eine diskrete Darstellung überführen. Die Farbinformation in einer Zelle wird nun in einen einzigen, mittig angeordneten Punkt konzentriert, der zwar den vollen Ton der betrachteten Farbe besitzt, dafür aber nicht die gesamte Fläche der Zelle bedeckt. Punkte, die unterschiedliche Halbtöne darstellen sollen, erhalten zwar beim Drucken die gleiche Schichtdicke, was drucktechnisch einfacher zu realisieren ist als eine variable Schichtdicke, haben jedoch unterschiedliche Durchmesser, die theoretisch stufenlos variiert werden können.

Die Gesamtheit aller die Farbinformation darstellenden Punkte samt ihrer Größen und Anordnung zueinander wird als Raster bezeichnet. Das Bild muss so fein gerastert werden, dass Konturen ausreichend glatt wiedergegeben werden. Die Rasterzellengröße liegt bei vielen Produkten in der Größenordnung von 150 µm bis 250 µm. Außerdem muss die Rasterpunktgröße in ausreichend vielen Stufen einstellbar sein, um Farbverläufe ohne sichtbare Sprünge darstellen zu können. Aufgrund der Eigenschaften des visuellen Systems des Menschen werden deshalb mindestens 150 Halbtonstufen benötigt. Die Rasterpunktgröße liegt daher bei mehreren 10 µm. Das menschliche Auge nimmt dann bei ausreichend großem Betrachtungsabstand nicht mehr die einzelnen Rasterpunkte wahr sondern die aus belegten und nicht belegten Flächenanteilen resultierenden Halbtöne.

Unter Flächendeckung oder (Raster-) Tonwert wird das prozentuale Verhältnis der Rasterpunkt- zur Rasterzellenfläche

$$F = \frac{A_{\text{Rasterpunkt}}}{A_{\text{Rasterzelle}}} \quad (2.1)$$

definiert. So bedeckt ein Rasterpunkt bei einem 40prozentigen Raster 40 % der Gesamtfläche der Rasterzelle [HDM99]. Ein Vollton entspricht einer Flächendeckung von 100 %. Je nachdem, ob beim Drucken die Übertragung von Voll- oder Halbtönen von Interesse ist, wird in der Praxis von Flächen- bzw. Rasterdruck gesprochen. Die Flächendeckung eines gedruckten Rasterfelds  $F_{\text{Druck}}$  unterscheidet sich im Allgemeinen prozessbedingt von der Soll-Flächendeckung  $F_{\text{Soll}}$  um den Betrag

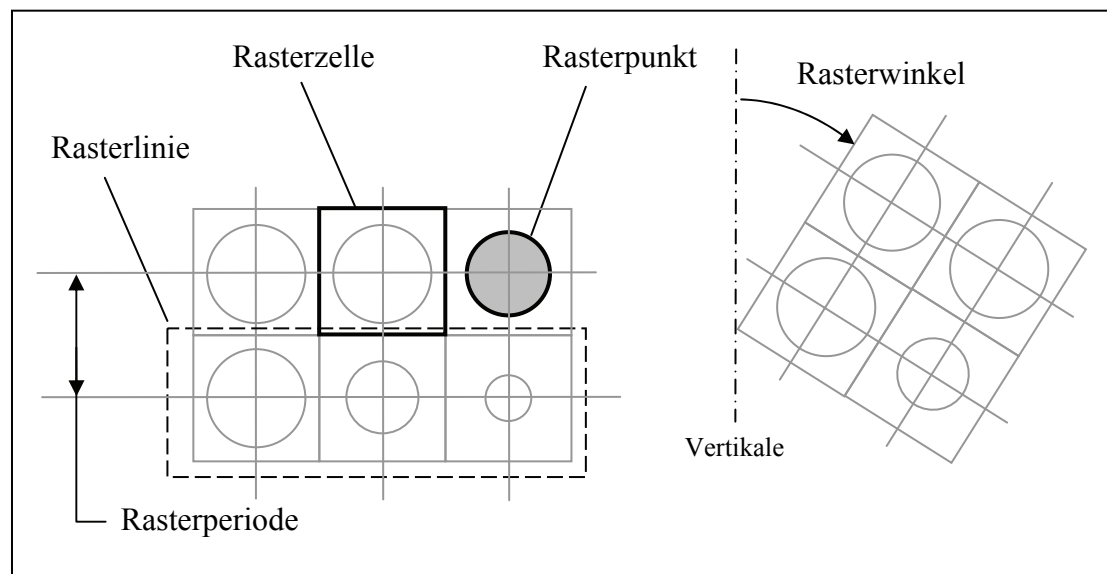
$$Z = F_{\text{Druck}} - F_{\text{Soll}} \quad (2.2)$$

die so genannte Tonwertzunahme [HDM99].

Die Rasterpunkte können verschiedene Formen annehmen. Neben rund werden auch Ellipsen-, Rauten- und kombinierte Punktformen eingesetzt, über deren Vorzug das

jeweils vorliegende Bildmotiv entscheidet. Bei den helleren Halbtönen stehen die Rasterpunkte offen, berühren sich mit dunkler werdendem Halbton und werden kurz vor dem Vollton nur noch durch Lichter voneinander getrennt. Halbtöne, die mittig zwischen dem Vollton und Weiß liegen, d. h. mit etwa  $40\% < F < 60\%$ , werden Mitteltöne genannt, die noch helleren bzw. dunkleren Viertel- bzw. Dreivierteltöne.

Zusammen mit dem Raster lassen sich zwei Hauptrichtungen definieren, eine Horizontale und eine Vertikale, die z. B. nach den Bogenkanten auszurichten sind, Abbildung 2.6.



**Abbildung 2.6:** Rasteraufbau. Dargestellt ist ein amplitudenmodulierter (AM-) Raster, bei dem benachbarte Rasterpunkte den gleichen Abstand zueinander, jedoch unterschiedliche Größen haben. Beim Drucken bekommen alle Rasterpunkte die gleiche Farbschichtdicke, sodass der Halbton allein durch die Flächendeckung bestimmt wird.

Horizontal angeordnete Rasterpunkte bilden eine Rasterlinie. Der Abstand zwischen zwei Rasterlinien ist die Rasterperiode, deren Kehrwert, also die Anzahl der Rasterlinien pro Längeneinheit, die Rasterfrequenz ist. Diese wird in Linien pro cm oder pro Zoll angegeben. Ein 60er Raster hat 60 Rasterlinien pro cm. Das Raster kann außerdem zweckmäßig um einen Winkel gedreht werden – den Rasterwinkel.

Der in Abbildung 2.6 dargestellte Raster besteht aus Punkten, die den gleichen Abstand zu den Nachbarpunkten haben und sich lediglich in der Größe unterscheiden, und wird deshalb amplitudenmoduliertes (AM-) Raster genannt. Andere Rasterstrukturen sind denkbar, wie z. B. das frequenzmodulierte (FM-) Raster, bei dem die Rasterpunkte die gleiche Größe haben, jedoch unterschiedlich dicht zueinander sitzen.

## 2.6 Mehrfarbendruck

Liegen Mehrfarbenbilder vor, also Bilder mit mehr als eine Farbe und ihre Halbtöne, so müssen sie zunächst in vier monochrome Grundfarben (Farbauszüge) separiert werden. Beim Drucken sind dies die Druckfarben Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz. Jeder Farbauszug wird entsprechend Abschnitt 2.5 gerastert. Abschließend werden alle Teilraster nacheinander überlagert gedruckt, wodurch der Eindruck der Mehrfarbigkeit entsteht.

Bei der AM-Rasterung liegen die Rasterpunkte periodisch, sodass die Überlagerung verschiedener Farbauszüge sich auf dem Druckbild als störende Interferenzmotive niederschlagen kann. Um diesen Effekt zu vermeiden, werden die einzelnen Farbauszüge zusätzlich um einen definierten Rasterwinkel relativ zueinander gedreht. Abweichungen in Rasterpunktgröße, -lage oder -winkel, sowohl innerhalb eines Teilrasters als auch relativ zu anderen Teilrastern, führen zu unerwünschten Tonwertverschiebungen. Es ist beim Drucken eine der wichtigsten und zugleich schwierigsten Aufgaben, mikroskopische Rasterpunkte hinsichtlich Größe und Lage genau und reproduzierbar auf einen großflächigen Bedruckstoff zu positionieren.

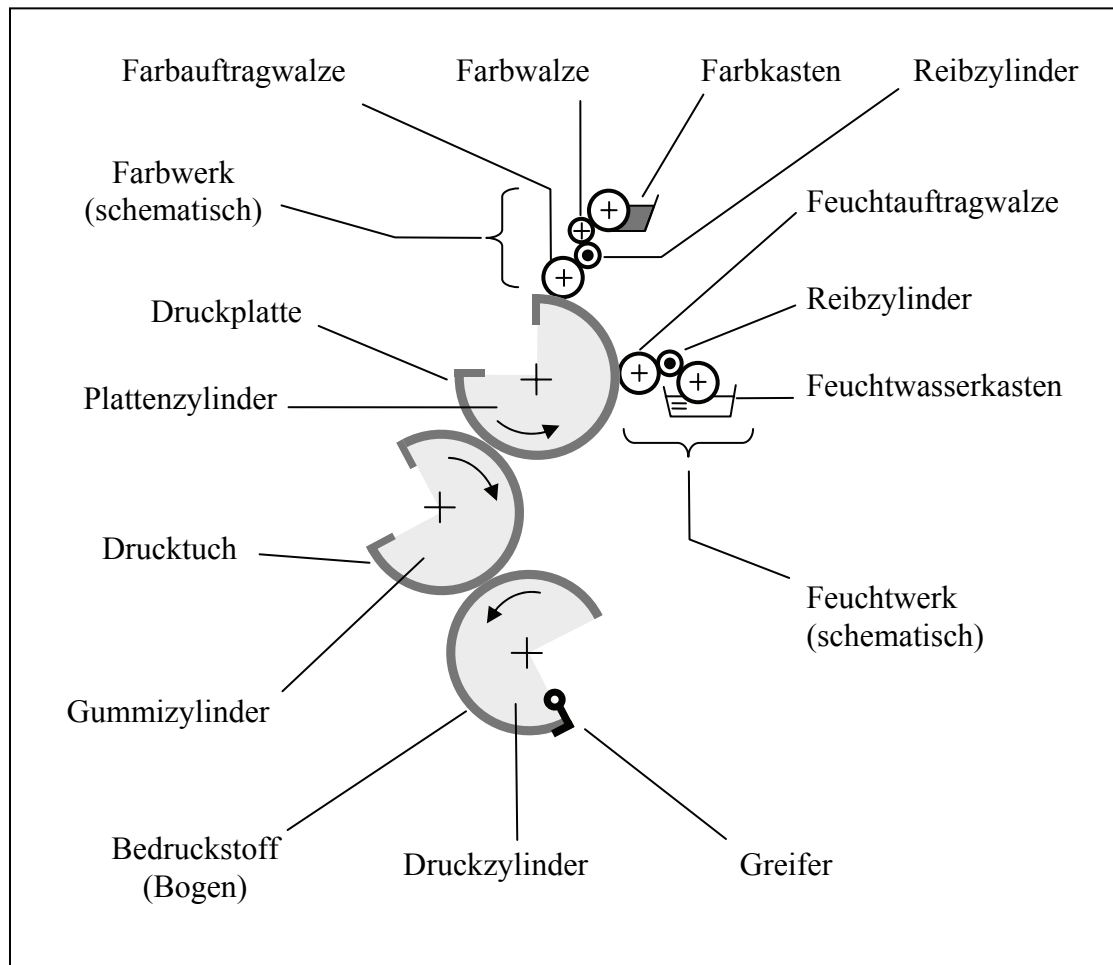
## 2.7 Offsetdruckverfahren

Der Offsetdruck ist ein indirektes, rotatives Flachdruckverfahren, bei dem die eingefärbte Druckform (Druckplatte oder Platte genannt) Druckfarbe zunächst auf einen weichen Gummibelag (das Gummi- oder Drucktuch) und von dort aus auf den Bedruckstoff überträgt [TES89], [WAL91], [KIP00]. Entsprechend dem rotativen Druckprinzip werden Druckplatte, Drucktuch und Bedruckstoff von einem Zylindersystem getragen: dem Platten-, Gummizylinder und Druckzylinder, Abbildung 2.7.

Druckplatte und Drucktuch rollen aufeinander ab, wobei sie zwecks Farbübertragung zusätzlich radial gegeneinander gepresst werden. Die Eindrückung der Druckplatte in das (weichere) Drucktuch liegt typisch zwischen 0,1 mm und 0,2 mm. Der Bedruckstoff wird um den Druckzylinder geführt. Zwischen Drucktuch und Bedruckstoff wird je nach Bedruckstoffdicke eine Eindrückung von typisch 0,1 mm bis 0,2 mm eingestellt.

Der Einsatz von Gummi als Zwischenträger führt einerseits zu geringeren, gleichmäßigeren Druckspannungen, wodurch Druckplatte und Bedruckstoff weniger belastet werden, als wenn sie direkt aufeinander abrollen würden. Andererseits werden die Un-

ebenheiten der Bedruckstoffoberfläche ausgeglichen, wodurch die Druckfarbe die druckenden Bildstellen vollständig belegt.

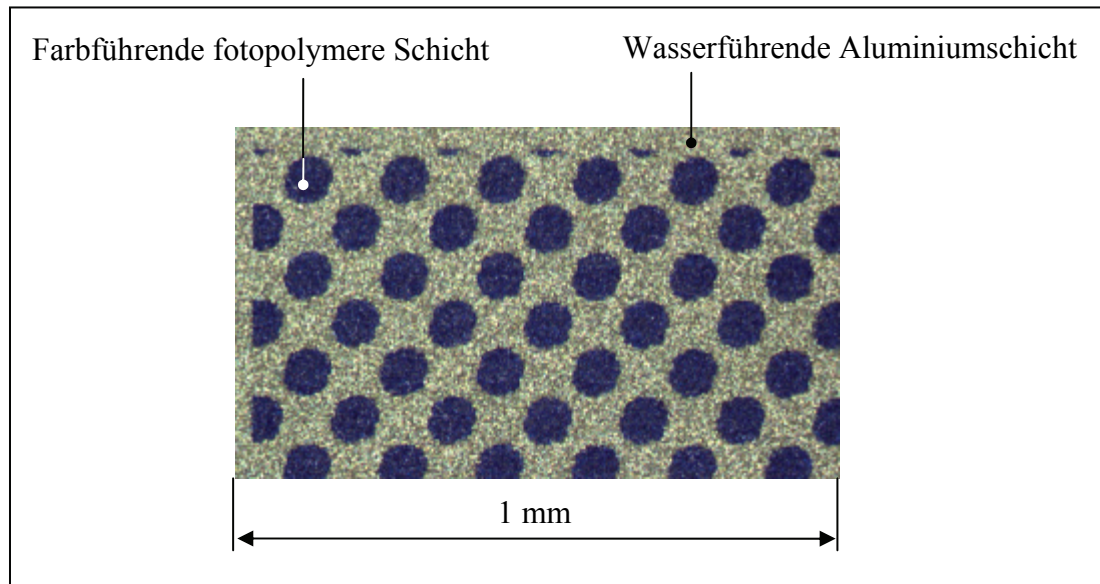


**Abbildung 2.7:** Schematische Darstellung des Offsetdruckverfahrens. Farb- und Feuchtauftragwalzen tragen durch Kontakt die im Farb- und Feuchtwerk aufbereitete Farb- bzw. Wasserschicht auf das Druckbild auf. Nach Einfärbung wird das Druckbild von der Druckplatte zuerst auf das Drucktuch und von dort aus auf den Bedruckstoff übertragen.

Die Offsetdruckfarbe besitzt eine hohe Viskosität, sodass sie beim Drucken nicht „wegfließt“. Sie wird im Farbwerk aufbereitet, das aus einer Vielzahl von Farbwalzen bzw. Reibzylindern besteht. Die Farbwalzen rollen aufeinander ab und fördern die Druckfarbe von dem Farbkasten in Richtung Druckplatte hin. Die Reibzylinder sind in das Farbwalzensystem verteilt eingebaut und sorgen durch axiale Bewegung dafür, dass die Druckfarbe nicht nur in Walzenumfangsrichtung sondern auch über die Walzenbreite abgewälzt wird. Die Farbauftragwalzen sind die letzten Walzen im Farbwerk, auf denen die aufbereitete Druckfarbe als zusammenhängender Film vorliegt, dessen Dicke einige  $\mu\text{m}$  beträgt. Meistens sind es vier Farbauftragwalzen, die gegen die

Druckplatte gepresst sind und die Druckfarbe auf die druckenden Stellen der Druckplatte auftragen.

Die Druckplatte besteht aus einem ca. 0,3 mm dicken Aluminiumblech, das mit einer farbaffinen, einige  $\mu\text{m}$  dicken, fotopolymeren Schicht vorbeschichtet ist. Die Druckplatte wird heute meist mithilfe eines Laserstrahls an den nichtdruckenden Stellen belichtet, wodurch dort die farbfreundliche Schicht entfernt wird und die wasserfreundliche Aluminiumschicht freigesetzt wird, Abbildung 2.8.



**Abbildung 2.8:** Mikroskopische Aufnahme eines auf einer Offsetdruckplatte abgebildeten Rasterfelds. Gut zu erkennen ist die gekörnte Aluminiumstruktur, die für eine gute Wasserannahme sorgt.

Um zu verhindern, dass durch Kontakt mit den Farbauftragwalzen auch die nichtdruckenden Stellen, also die freigesetzte Aluminiumoberfläche, eingefärbt werden, werden diese Stellen vor dem Einfärben mit einer einige  $\mu\text{m}$  dünnen Wasserschicht benetzt. Die Aluminiumoberfläche wird zusätzlich aufgeraut, wodurch Mikrotaschen entstehen, die das Wasser beim Einfeuchten besser und länger aufnehmen.

Die Aufbereitung des Feuchtwassers erfolgt – analog zur Druckfarbe – im so genannten Feuchtwerk. Über ein System von Walzen und Reibzylindern wird das Feuchtwasser ausgehend von dem Wasserkasten zur Druckplatte hin transportiert. Die letzte Walze im Feuchtwerk ist die Feuchtauftragwalze. Sie enthält einen gleichmäßigen, zusammenhängenden, einige  $\mu\text{m}$  dünnen Wasserfilm, den sie durch direkten Kontakt mit der Druckplatte auf die nichtdruckenden Bildstellen überträgt. Das Feuchtwerk ist dem Farbwerk vorgeschaltet: die Druckplatte wird zuerst eingefeuchtet und erst dann

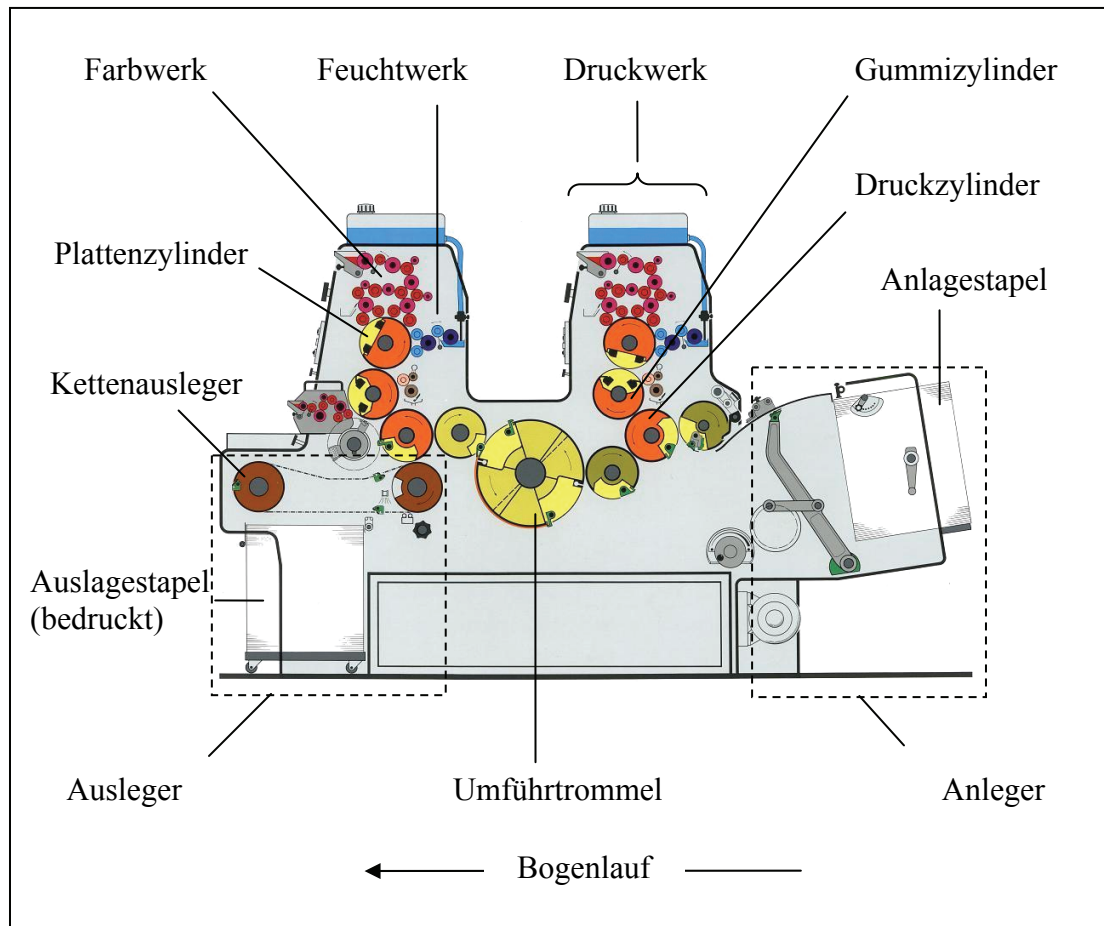
eingefärbt. Durch Beimischung von ca. 10 Vol.-% Isopropylalkohol (IPA) in das Feuchtwasser werden eine bessere Benetzung der Druckplatte sowie – durch die schnellere Verdunstung – ein dünnerer Wasserfilm und eine Oberflächenkühlung erreicht [AUL00].

Druckfarben müssen schnell trocknen, sodass der Bedruckstoff unmittelbar nach dem Drucken aufeinandergestapelt bzw. aufgerollt und weiterverarbeitet werden können. Wegschlagende Druckfarben trocknen durch Eindringen in den Bedruckstoff, andere benötigen eine Energiequelle (IR) oder trocknen konvektiv durch einen Luftstrom.

## 2.8 Offsetdruckmaschinen

Offsetdruckmaschinen lassen sich nach der Form des Bedruckstoffs in Bogen- und Rollenoffsetdruckmaschinen einteilen, je nachdem, ob ein Stapel aus einzelnen Bogen definierter Größe oder eine Rolle definierter Breite zu beducken ist. Die Größe des Bogens wird durch das Bogenformat beschrieben und bei Bogenoffsetdruckmaschinen immer als Bogenlänge x Bogenbreite angegeben, z. B. 48 x 64 cm.

Eine Bogenoffsetdruckmaschine besteht im einfachsten Fall aus einem Anleger, einem Druckwerk und einem Ausleger, Abbildung 2.9. Die abgebildete Druckmaschine wird im experimentellen Teil der Arbeit zur Durchführung der Druckversuchsreihe eingesetzt. Im Anleger werden die Bogen aus einem Stapel durch Saugluft vereinzelt, an ihrer Vorder- und einer Seitenkante ausgerichtet und in Richtung zum Druckwerk hin beschleunigt. Das Druckwerk besteht aus dem Platten-, Gummi- und Druckzylinder sowie dem Feucht- und Farbwerk und stellt aus konstruktionstechnischer Sicht eine Baueinheit dar, mit der die Druckmaschine entsprechend der Anzahl der zu druckenden Farben modular ausgestattet werden kann. Sind die Druckwerke hintereinander geschaltet, entsteht eine Reihensbauweise. Die Platten-, Gummi- und Druckzylinder weisen in ihrem Umfang Aussparungen (Kanäle) auf, in denen die Einrichtungen zur Montage der Druckplatte, zum Vorspannen des Drucktuchs und die Greifer zur Aufnahme des Bedruckstoffs sitzen. Durch diese Aussparungen wird der Abrollvorgang für etwa eine Viertelumdrehung unterbrochen (Kanaldurchgang). Die Drucktücher werden im Bogenoffset auf etwa 1 % bis 2 % ihrer Länge vorgespannt, was einer Spannkraft von etwa 300 bis 500 N pro cm Breite entspricht. Da das Drucktuch über Einspannwelle am Gummizylinder befestigt wird, geben die Druckmaschinenhersteller zur Drucktuchbefestigung statt einer Spannkraft ein Spannmoment an, das jedoch von der Konstruktion des Spannsystems abhängig ist.



**Abbildung 2.9:** Seitenansicht einer Bogenoffsetdruckmaschine (MOZ-P, Heidelberger Druckmaschinen) in Reihenbauweise mit Anleger, zwei Druckwerken (Zweifarbendruckmaschine) und Ausleger [HDM85]. Ein Druckwerk besteht aus Farb-, Feuchtwerk sowie Platten-, Gummi- und Druckzylinder. Gut zu erkennen ist außerdem die Anordnung der Platten-, Gummi- und Druckzylinderachsen (so genannte 5-Uhr-Stellung).

Im Ausleger werden die bedruckten Bogen gebremst, dem letzten Druckwerk mittels eines Kettensystems entnommen und ausgerichtet gestapelt. Falls die Druckfarbe nicht durch Wegschlagen trocknet, wird die Druckmaschine vor dem Ausleger zusätzlich mit einer Trockenstrecke ausgerüstet.

Die Druckrichtung ist diejenige Richtung, in der die Bogen die Druckmaschine durchlaufen, und entspricht bei den Platten-, Gummi- und Druckzylindern der Zylinderumfangsrichtung. Wird als Bedruckstoff Papier eingesetzt, so können außerdem Breit- und Schmalbahnbogen unterschieden werden, je nachdem, ob die Papierfasern in oder quer zur Druckrichtung liegen.

Die Druckgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der ein Bogen bei der Farbannahme die Kontaktzone zum Drucktuch passiert, und wird in m/s ausgedrückt. Sie

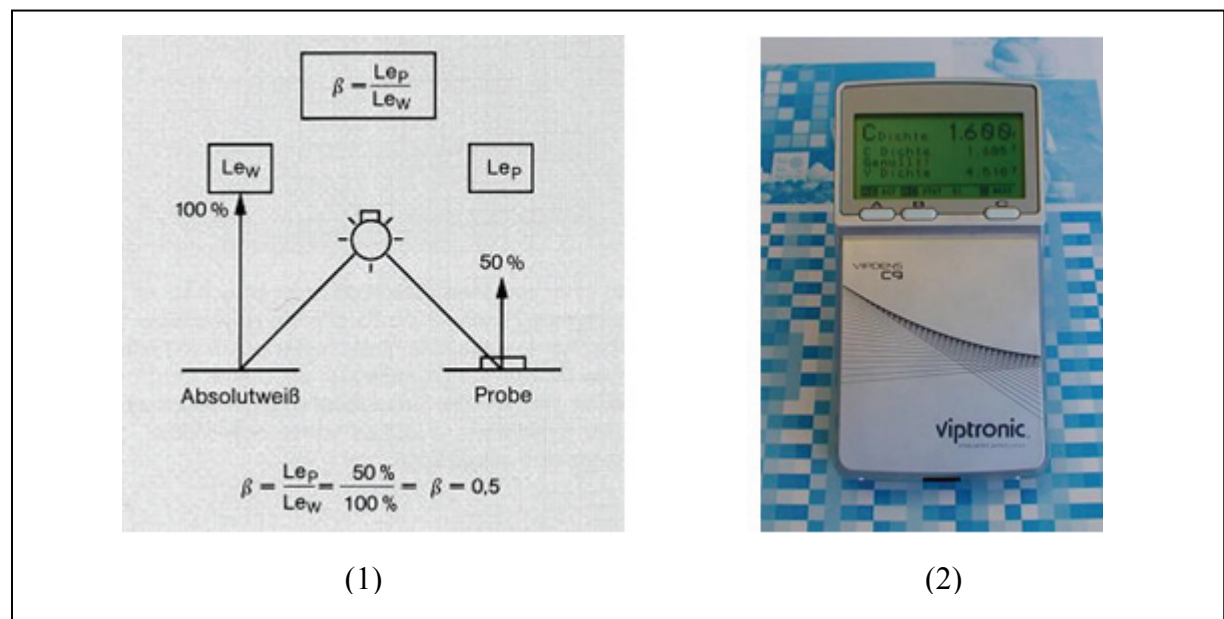


entspricht etwa der Umfangsgeschwindigkeit des abrollenden Drucktuchs. In der Praxis wird die Druckgeschwindigkeit einer Bogenoffsetdruckmaschine auch als Anzahl der pro Stunde gedruckten Bogen angegeben (B/h).

## 2.9 Farbschichtdicke und Tonwert

Ein wichtiges Kriterium für die Druckqualität einer Druckmaschine ist die Gleichmäßigkeit der gedruckten Farbschichtdicke. Wie dicht eine Farbe für den Betrachter erscheint, nimmt mit der Dicke der auf Papier übertragenen Farbschicht zu. Bei Vollflächen soll beim Drucken eine konstante Farbdichte verwirklicht werden.

Zur messtechnischen Erfassung der Farbschichtdicke wird vorzugsweise die Densitometrie verwendet, Abbildung 2.10. Die entsprechenden Geräte (Densitometer) sind meistens tragbar, sodass direkt auf den gedruckten Bogen an der interessierenden Stelle schnell und einfach gemessen werden kann.



**Abbildung 2.10:** Densitometrische Farbdichtenmessung [HDM92]. (1) Messprinzip. Der Farbdichtewert leitet sich aus der Lichtmenge, die vom Hintergrund (Absolutweiß) bzw. von der Farbschicht zurückgestrahlt wird. (2) Densitometer der Fa. Viptronic. Messungen können direkt auf dem Bogen an Vollton- und Rasterfeldern vorgenommen werden.

Bei der densitometrischen Farbdichtemessung wird der Densitometer zuerst auf den Bogen an einer nicht bedruckten Stelle zur Erfassung eines Absolutweißes (Referenzweiß) gesetzt [HDM99], [OTT95]. Eine im Densitometer eingebaute Lichtquelle sendet Licht auf das Referenzweiß aus und ermittelt die zurückgestrahlte Lichtmenge  $Le_w$ . Danach wird auf der bedruckten Stelle gemessen. Da die Druckfarbe zum Teil

Licht absorbiert, ist die zurückgestrahlte Lichtmenge  $Le_P$  kleiner als beim Referenzweiß. Das Verhältnis aus beiden Werten

$$\beta = \frac{Le_P}{Le_w} \quad (2.3)$$

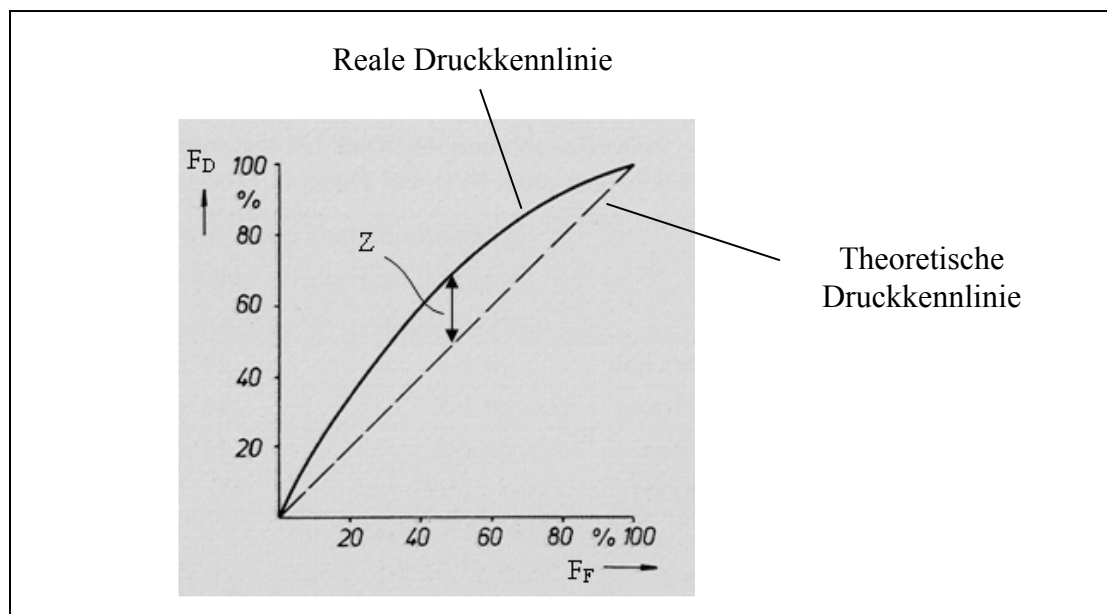
ist der Remissionsgrad  $\beta$ , der von ihm über die Beziehung

$$D_V = \log\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (2.4)$$

abgeleitete Wert die Farbdichte (optische Dichte), wobei sich der Index V auf „Vollton“ bezieht. Typisch für die Druckfarbe Cyan ist  $D_V = 1,5$ . Wird nun eine Messung in einem Rasterfeld vorgenommen, so resultiert eine Farbdichte  $D_R$  (Index R: Rasterfeld), die kleiner ist als die im Vollton. Wird beim Vollton- und Rasterfeld von der gleichen Farbschichtdicke ausgegangen, so resultiert dieser Unterschied aus der geringeren Flächendeckung beim Rasterfeld. Diese kann dann nach der Beziehung

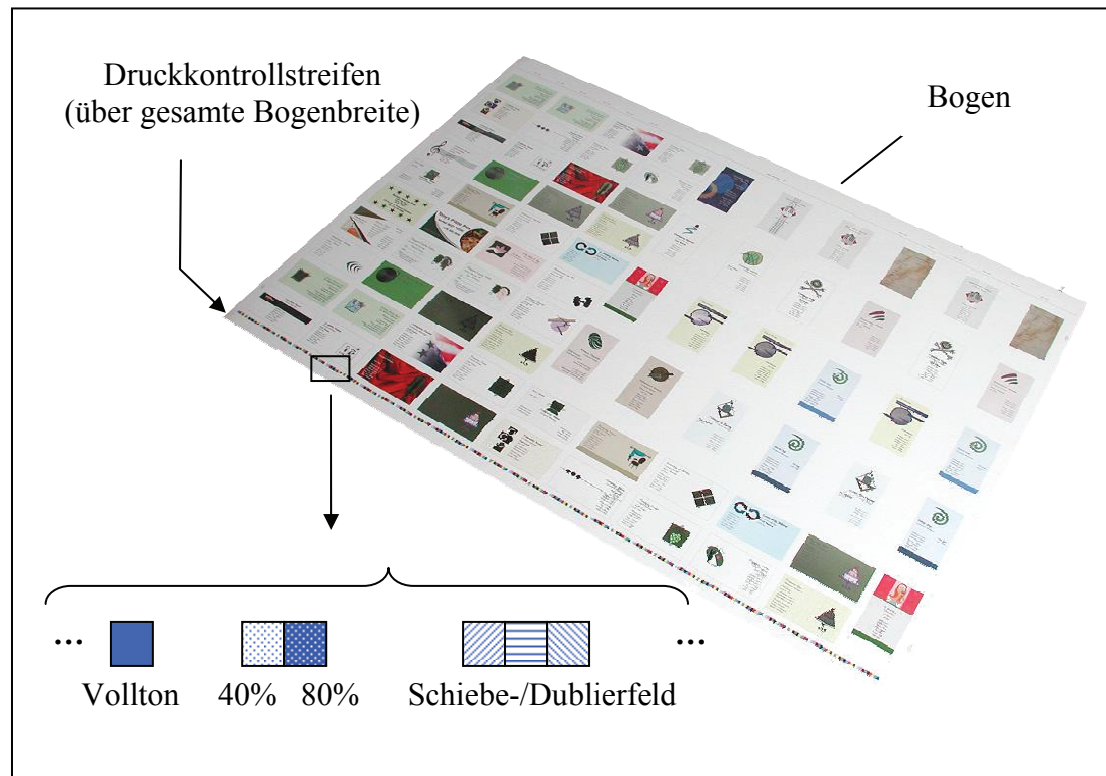
$$F_{Druck} = \frac{1 - 10^{-D_R}}{1 - 10^{-D_V}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

prozentual ermittelt werden [HDM99]. Die Tonwertzunahme nach Gl. 2.2 lässt sich mit Gl. 2.5 errechnen und z. B. anhand eines mitgedruckten Halbtonkeils für verschiedene Tonwerte messen, woraus die für einen Druckprozess charakteristische Druckkennlinie resultiert, Abbildung 2.11.



**Abbildung 2.11:** Druckkennlinie [HEL93]. Die theoretische Druckkennlinie würde sich ergeben, wenn die im Druck gemessenen Rastertonwerte den Sollwerten entsprechen würden. Die Tonwertzunahme ist im Mittelton am größten.

In der Praxis erfolgt die Dichtemessung nicht auf dem Druckbild selbst sondern auf einem am Bildrand liegenden Druckkontrollstreifen, Abbildung 2.12. Dieser erstreckt sich über die gesamte Bogenbreite und besteht für jede Druckfarbe bzw. Druckwerk jeweils aus Messfeldern zur densitometrischen Erfassung der Farbdichte im Vollton und Raster sowie aus Schiebe-Dublierfeldern. Diese bestehen aus schräg und waage-recht angeordneten feinen Linien, die breiter werden und somit dunkler erscheinen, wenn prozessbedingt das Druckbild verzerrt bzw. doppelt gedruckt wird.



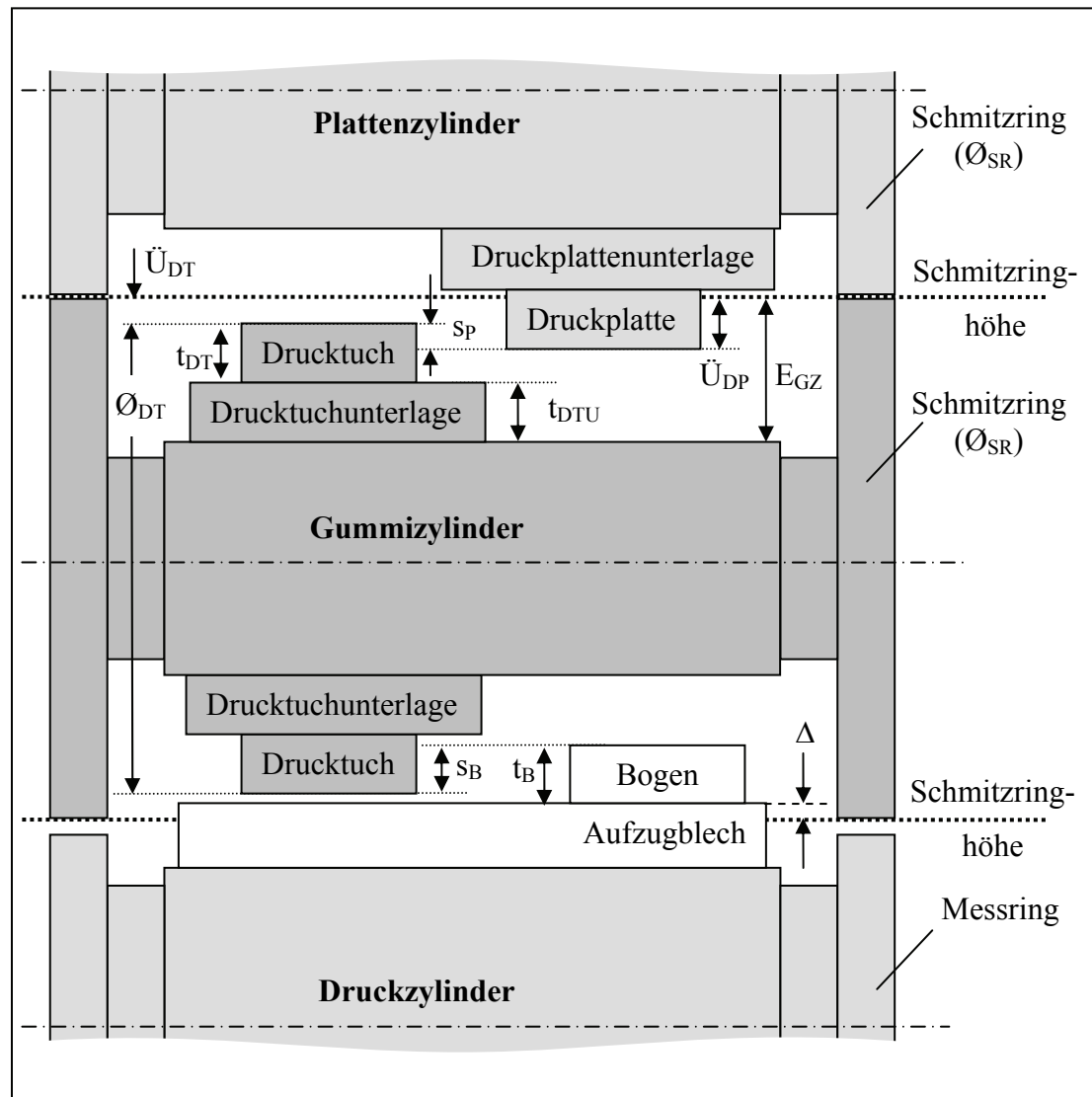
**Abbildung 2.12:** Ausschnitt aus dem Druckkontrollstreifen mit Vollton-, Rasterton- und Schiebe-/Dublierfeld. Der Druckkontrollstreifen ist im Randbereich geordnet. Auf dem Bogen selbst sind hier Visitenkarten gedruckt.

## 2.10 Druckabwicklung

Die Abrollung des Drucktuchs auf die Druckplatte bzw. den anliegenden Bedruckstoff wird mitunter auch als Druckabwicklung bezeichnet und neben den Werkstoffbeschaffenheiten der an der Abrollung beteiligten Elemente auch von den geometrischen Verhältnissen der Kontaktzonen beeinflusst, Abbildung 2.13.

Platten- und Gummizylinder rollen aufeinander sowohl über ihre Mantelflächen als auch über Ringe (so genannte Schmitzringe) aus gehärtetem Stahl ab, die jeweils an den beiden Zylinderenden angeordnet sind. Diese sind zusätzlich in radialer Richtung gegeneinander gepresst, sodass durch die resultierende Vorspannung ein ruhiger Zy-

linderlauf erreicht werden kann. Platten- und Gummizylinder haben gleichgroße Schmitzringe.



**Abbildung 2.13:** Geometrische Kenngrößen zur Druckabwicklung. Die Durchmesser sind zwecks besserer Übersicht nicht maßstabgerecht dargestellt. Werte der Versuchsmaschine MOZ-P: Der Schmitzringdurchmesser liegt bei 220 mm, der des unaufgezogenen Platten- bzw. Gummizylinders bei 219 mm bzw. 213,6 mm, woraus ein Einstich von 3,2 mm bzw. 0,5 mm resultiert. Moderne Bogenoffsetdruckmaschinen haben am Plattenzylinder einen noch kleineren Einstich von 0,2 mm. Der Druckzylinder hat einen Durchmesser von 219,7 mm und wird mit einem 0,3 mm dicken Aufzugblech verkleidet.

Meistens muss der Durchmesser des Platten- und/oder Gummizylinders im Hinblick auf bessere Druckbildübertragung um geringfügige Beträge korrigiert werden, sodass die Zylinderdurchmesser in der Praxis nicht absolut angegeben werden. Vielmehr wird lediglich die Differenz zum Schmitzringdurchmesser angegeben, woraus z. B. für das montierte Gummituch der so genannte Drucktuchüberstand (oder Drucktuchhöhe)

$$\ddot{U}_{DT} = \frac{1}{2}(\varnothing_{DT} - \varnothing_{SR}) \quad (2.6)$$

resultiert, mit  $\varnothing_{DT}$  bzw.  $\varnothing_{SR}$  dem Drucktuchaußen- bzw. Schmitzringdurchmesser. Die Mantelfläche des unaufgezogenen Gummizylinders sitzt um den Betrag  $E_{GZ}$  (Gummizylindereinstich) tiefer als der Schmitzring. Beim Aufspannen werden zwischen Drucktuch und Gummizylindermantelfläche kalibrierte Unterlagebogen (Drucktuchunterlage) gesetzt, die den Durchmesser des gespannten Drucktuchs fein einstellen. Der Drucktuchüberstand  $\ddot{U}_{DT}$  ergibt sich somit aus dem Einstich  $E_{GZ}$  sowie der Dicke des Drucktuchs und dessen Unterlagen über die Beziehung

$$\ddot{U}_{DT} = E_{GZ} - (t_{DT} + t_{DTU}) \quad (2.7)$$

und kann positiv, negativ oder null sein, je nach dem, ob das gespannte Drucktuch im Vergleich zum Schmitzring höher, tiefer oder gleichhoch sitzt. Die bisher eingeführten Größen gelten gleichermaßen auch für Plattenzylinder und Druckplatte, und es gilt:

$$\ddot{U}_{DP} = E_{PZ} - (t_{DP} + t_{DPU}). \quad (2.8)$$

Die Eindrückung  $s_P$  der Druckplatte in das Drucktuch resultiert aus der Beziehung

$$s_P = \ddot{U}_{DP} + \ddot{U}_{DT} \quad (2.9)$$

mit  $\ddot{U}_{DP}$  und  $\ddot{U}_{DT}$  den vorzeichenbehafteten Überständen von Druckplatte und Drucktuch aus Gln. 2.7 und 2.8.

Der Druckzylinder besitzt seitlich keine Schmitzringe sondern Messringe, die mit den Schmitzringen des Gummizylinders nicht in Berührung kommen. In dem auf dieser Weise vorhandenen Spiel kann der Gummizylinder durch Aufschwenken (Drehachse = Plattenzylinderachse) um den Weg  $\Delta$  (Druckzylinderbeistellung) von einigen Zehntelmillimetern auf den bzw. von dem Druckzylinder zu bzw. wegbewegt werden. Dadurch kann eine positive bzw. negative Druckzylinderbeistellung eingestellt werden. Als Referenzlage  $\Delta = 0$  wird diejenige Stellung genommen, bei der der Druckzylinder mit montierter Verkleidung (Aufzugblech) genau in Schmitzringhöhe liegt. Die Eindrückung  $s_B$  des um den Druckzylinder geführten Bogens in das Drucktuch folgt aus der Beziehung

$$s_B = t_B + \ddot{U}_{DT} + \Delta, \quad (2.10)$$

wobei  $\ddot{U}_{DT}$  und  $\Delta$  nach wie vor vorzeichenbehaftet einzusetzen sind.

### 2.11 Gestaltung der Kontaktzonen

Der Gestaltung der Kontaktzonen zwischen Drucktuch, Druckplatte und Bedruckstoff wird im Offsetdruck eine große Bedeutung beigemessen. Um gute, reproduzierbare Druckergebnisse zu erzielen, müssen die an der Abrollung beteiligten Elemente Drucktuch, Druckplatte, Bedruckstoff und färbende Substanz hinsichtlich mechanischer, physikalischer und chemischer Eigenschaften sowie Drucktuchdurchmesser (im Montagezustand), Dicke der Druckplattenunterlagen, Eindrückung und Druckgeschwindigkeit aufeinander abgestimmt werden.

Die Regelung des Druckprozesses über die Druckabwicklung hat im Vergleich zur Farb- und Feuchtwasserregelung den Vorteil, dass kein zusätzlicher Stoff in den Prozess gebracht wird. Von großer praktischer Bedeutung wäre ein Drucktuch, das gleich gute Druckergebnisse liefert, während die Prozessparameter in einem breiten Fenster variieren dürfen. Solch ein Drucktuch hätte unabhängig von der Einstellung der Prozessparameter folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Aufbau einer in der Kontaktzone ausreichend hohen Druckspannung mit der Möglichkeit, den Druckspannungsverlauf in der Kontaktzone auf das Spaltungsverhalten der färbenden Substanz abzustimmen.
- Sicherstellung einer hohen Rasterpunktschärfe durch Minimierung der evtl. in der Kontaktzone auftretenden Relativbewegungen (Schlupf) zwischen Drucktuch, Druckplatte und Bedruckstoff.

Der Zustand des perfekten Haftens zwischen Drucktuch und Druckplatte bzw. Bedruckstoff beim Abrollen wird mitunter auch als True Rolling (TR) bezeichnet.

### 3 Stand der Technik und der Wissenschaft

Zum Thema „Mechanisch-drucktechnisches Drucktuchverhalten“ sind in den letzten Jahren nur wenige Untersuchungen veröffentlicht worden. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die wichtigsten Untersuchungen gegeben, um insbesondere die Frage „wie gut können heute die mechanischen Eigenschaften eines Drucktuchs rechnerisch erfasst werden, um dessen drucktechnische Eigenschaften vorausszusagen?“ zu beleuchten.

Folgende Systematik soll die Beschreibung einzelner Beiträge erleichtern. Nach einem kurzen Überblick über den heutigen Stand des Offsetdrucks als wichtigen Einsatzgebiets für Drucktücher werden wichtige Begriffe und Eigenschaften zum Drucktuch und dessen Aufbau gegeben. Anschließend werden die „klassischen“ Untersuchungen beschrieben. Diese umfassen Arbeiten, die stark druckpraxisorientiert sind und auf älteren, etablierten Drucktuchprüfmethoden basieren. Neuere, materialorientierte und modellbasierte Untersuchungen werden in den darauf folgenden, zusätzlich nach Schwerpunkt eingeteilten Abschnitten dargestellt. Arbeiten zu Themen mit Verwandtschaft zum Drucktuch, wie beispielsweise Abrollvorgängen bei Farbwalzen, werden an geeigneter Stelle ebenfalls kurz erwähnt.

Die folgenden Ausführungen basieren auf einer Auswertung der FOGRA-, UGRA-, IFRA-, IAIRIGAI- und TAGA-Datenbanken, firmenspezifischer Schriften, insbesondere der Firmen Birkan und ContiTech, sowie der Fachzeitschriften Deutscher Drucker, Druckindustrie, Druck Print, Druckspiegel, Offsetpraxis und Polygraph.

#### 3.1 Offsetdruck und Drucktuch heute

Der Offsetdruck konnte in den letzten Jahren deutliche Fortschritte verzeichnen, insbesondere in Maschinensteuerung und -automatisierung, Druckgeschwindigkeit, Bogentransport sowie Druckveredelung. Das Verfahren zeichnet sich durch die breite Auswahl des Bedruckstoffs (Papier, Folie, Karton, Wellpappe u. a.), der Bedruckstoffdicke (von 0,03 mm bis etwa 3 mm) und der Druckfarbe wie kein anderes Druckverfahren aus. Heute sind im Bogenoffset Druckgeschwindigkeiten von 5 m/s bzw. 18000 B/h möglich. Außerdem konnte in den letzten Jahren eine Zunahme des Bogenformats verzeichnet werden, wie z. B. das Super-Großformat 151 x 205 cm ( $\hat{=}$  ca. 3 m<sup>2</sup>) der KBA Rapida 205 zeigt. Drucken im Rollenoffset erfolgt heute bis zu

Papierbahngeschwindigkeiten von 17 m/s ( $\hat{=}$  ca. 60 km/h) bzw. rund 40 000 Zylinderumdrehungen pro Minute.

Drucktücher sind überwiegend für den Bogen- oder Rollenoffsetdruck bestimmt. Ein weiteres kleineres Einsatzgebiet ist der Digitaldruck, wie ihn beispielsweise die Firma HP Indigo bei ihren auf das elektrofotografische Druckverfahren basierenden Druckmaschinen anbietet, bei dem die Drucktücher verfahrensbedingt auch elektrostatische Anforderungen zu erfüllen haben. Es existieren heutzutage weltweit rund 10 Hersteller von Drucktüchern, die das Drucktuch komplett fertigen können. Zu ihnen zählen die Firmen (mit ihren typischen Drucktüchern in Klammern) ContiTech Northheim (Litho HC, FSR TR), Meiji Rubber & Chemical Tokyo (Perfect Dot), Reeves Spartanburg (Vulcan Folio) und die seit 2006 zu ContiTech gehörende Firma Phoenix Xtra Print Hamburg (Sapphire, Topaz). Weitere Firmen können lediglich das Drucktuch auf Maß konfektionieren und ihm bestimmte kundenspezifische Eigenschaften verleihen und versehen es oft mit dem eigenen Namen. Daraus resultiert eine unüberschaubare Anzahl an Drucktuchmarken, die sich jedoch angesichts der einen oder anderen Eigenschaft ähnlich verhalten.

Unabhängig von der Drucktuchmarke werden im Offsetdruck im Hinblick auf die Anwendung zahlreiche Anforderungen an die Drucktücher gestellt. So werden beispielsweise Drucktücher unterschiedlicher Formate, Spannsysteme und Preise benötigt, jeweils für den Zeitungsdruck (hohe Druckgeschwindigkeit, raue Paperoberfläche), den hochwertigen Bogenoffsetdruck (hohe Anforderungen an Vollflächen- und Rasterübertragungsgüte, glänzend gestrichene Papiere), den UV-Druck (UV-beständige Drucktuchoberfläche) u. a.

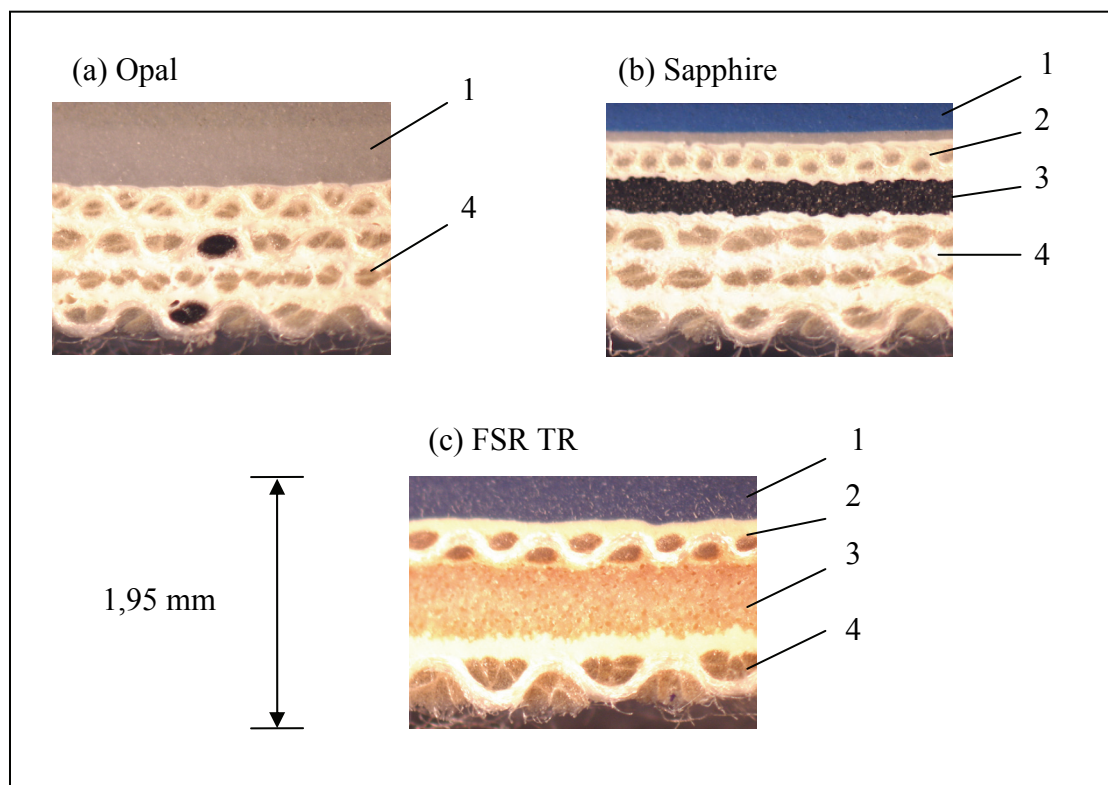
### 3.2 Drucktuchaufbau

Das Drucktuch wird in Form eines flächigen, 1,95 mm (auch 1,69 mm) dicken Mehrschichtverbundes (Laminat) gebaut, Abbildung 3.1. Je nach Laminataufbau werden konventionelle Drucktücher und Luftpolsterdrucktücher unterschieden. Letztere haben heute die größte praktische Bedeutung.

Konventionelle Drucktücher bestehen aus einer oben aufgetragenen Deckschicht sowie mehreren Festigkeitsschichten. Jede Festigkeitsschicht ist ein Baumwollgewebe mit Kett- und Schussfäden. Die Deckschicht besteht aus NBR-Kautschuk (NBR: Acrylonitril Butadien Rubber) mit guten mechanischen Eigenschaften und chemi-



scher Beständigkeit gegen Druckfarbe. Die Gummielastizität schützt Druckplatte und Gummituch gegen Abrieb und verleiht dem Ausdruck durch „bessere Farbübertragung und -fixierung bessere Glätte und Geschmeidigkeit“ [FUC94]. Die Festigkeitsschichten dienen dem Aufspannen des Drucktuchs um den Gummizylinder und der Aufrechterhaltung der Spannung während des Abrollens, was einer gummibedingten Relaxation entgegenwirkt. Die Porosität und Faserigkeit der Festigkeitsschichten verleiht jedoch dem konventionellen Drucktuch ein Maß an Kompressibilität. Konventionelle Drucktücher werden auch als inkompressible Drucktücher bezeichnet.



**Abbildung 3.1:** Querschnittsbilder von Drucktüchern. Alle Querschnitte haben eine Dicke von ca. 1,95 mm. (a) Konventionelles Drucktuch Opal der Firma Phoenix mit Deckschicht (1) und vier Festigkeitsschichten (4). (b) Luftpolsterdrucktuch Sapphire der Firma Phoenix für den Bogenoffset mit Deckschicht (1), Stabilisierungsschicht (2), Luftpolsterschicht (3) und drei Festigkeitsschichten (4). (c) Luftpolsterdrucktuch FSR TR der Firma ContiTech für den Rollenoffset mit Bestandteilen wie bei (b), jedoch mit einer einzigen Festigkeitsschicht (4).

Luftpolsterdrucktücher werden auch kompressible Drucktücher genannt und enthalten neben den Deck- und Festigkeitsschichten auch eine Luftpolsterschicht, die dem Drucktuch eine höhere Zusammendrückbarkeit verleiht. Unmittelbar unter der Deckschicht ist eine Stabilisierungsschicht – ebenfalls aus Baumwollgewebe – aufgebracht, die als Schub- und Flächenstabilisator fungiert [HER03a].

Falls eine genaue Unterscheidung nicht erforderlich ist, wird im Folgenden bei den Stabilisierungs- und Festigkeitsschichten von „Gewebe“, bei den Deck- und Luftpolsterschichten von „Elastomer“ gesprochen. In der Praxis werden die Schichten des Drucktuchs von oben nach unten nummeriert. Schicht 1 ist also die Deckschicht. Die in der Druckpraxis verbreitete Bezeichnung „3ply“ oder „4ply“ gibt die Anzahl der Gewebelagen im Drucktuch an. Die elastomeren Schichten werden dabei nicht mit angerechnet.

Bei einem Drucktuch lassen sich druckende und tragende Bestandteile unterscheiden. Erste bestehen aus der Deckschicht und der federnden Luftpolsterschicht, letzte werden von den Stabilisierungs- und Festigkeitsschichten gebildet.

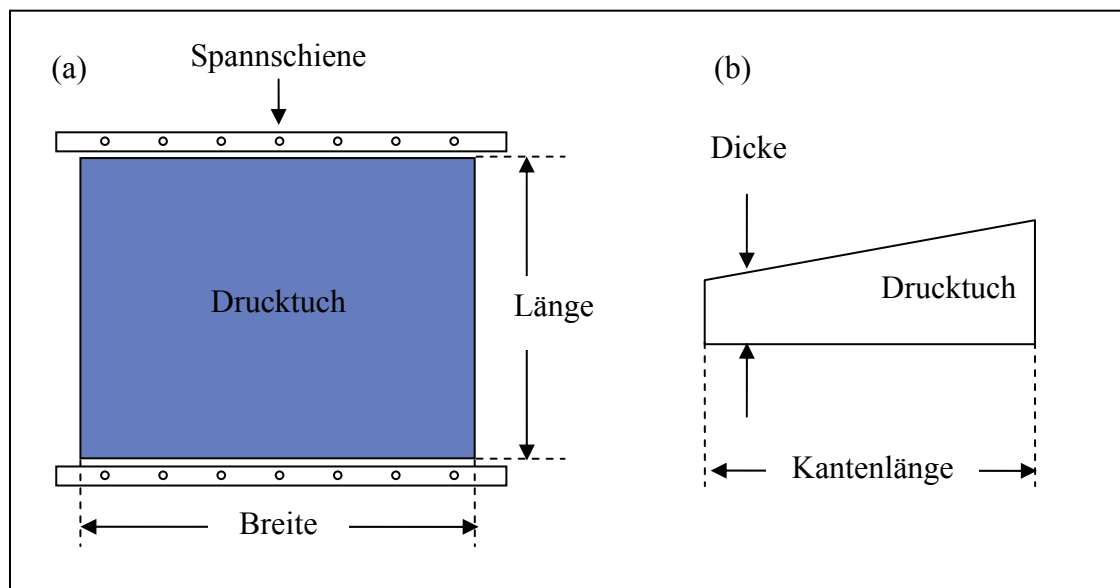
Bei der Herstellung des Drucktuchs erlangen die Gewebeschichten durch Strecken konstante, reproduzierbare Dicken und mechanische Eigenschaften. Die Luftpolsterschicht wird im Salzauswasch-, Hohlkugeleinbett- oder ContiTech-Blähverfahren, hergestellt [HER03b]. Zur Herstellung der Deckschicht kommen die aus der Kautschuktechnologie bekannten Verfahren Kalandrieren, Streichen und Vulkanisieren zum Einsatz. Die einzelnen Drucktuchschichten werden mittels Haftgummierung zu einem Drucktuch zusammengefügt, das anschließend auf Maß fertig geschliffen und einer Qualitätskontrolle unterzogen wird [DUN72], [MAR82]. Drucktücher werden als laufende Bahn hergestellt und nach der Fertigung wieder aufgerollt und gegebenenfalls auf Maß geschnitten. Die Richtung, in der das Drucktuch in die Druckmaschine gespannt werden soll (Druckrichtung), wird als feiner Strich an der Drucktuchunterseite markiert. Die Herstellung des Drucktuchs gehört mit den hohen Anforderungen bezüglich Planlage, Dickentoleranz ( $1,95 \text{ mm} \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$ ), Homogenität und Reinheit der Einzelschichten mit zu den anspruchsvollsten Verfahren in der Elastomertechnik überhaupt [RÖT06].

### 3.3 Drucktucheigenschaften

Die Drucktucheigenschaften werden in der Praxis oft in zwei Gruppen eingeteilt: die mechanisch-drucktechnischen und die physikalisch-chemischen. Obwohl mechanische Eigenschaften physikalischen Charakter haben, etwa die „Härte“ oder „Elastizität“, werden sie wegen ihrer Bedeutung für die Praxis oft separat angegeben. Im Folgenden sollen einige wichtige mechanisch-drucktechnische Eigenschaften etwas differenzierter erläutert werden. Auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften, zu denen Adhäsion

sionsneigung, Benetzungscharakteristik durch Öl, Wasser, Farbe und Lösungsmittel, Zusammensetzung der Deckschicht (Polymere, Füllstoffe, Weichmacher, Rezeptur), Alterung sowie Beständigkeit gegen Druckfarbe, Feuchtwasser und Waschmittel zählen, wird nicht ausführlich eingegangen (siehe dazu [HER03a]).

(a) Geometrische Eigenschaften: Dazu gehören Nenndicke, -breite und -länge des Drucktuchs, wobei dieses stets mit seiner Länge in Druckrichtung liegt. Die Dicken-  
genauigkeit gibt die Gleichmäßigkeit der Dickenverteilung über das gesamte Drucktuch an, Abbildung 3.2.



**Abbildung 3.2:** Geometrische Drucktucheigenschaften. (a) Draufsicht mit Drucktuchlänge und -breite. (b) Dickenschwankung über die Kantenlänge eines Drucktuchausschnitts. Heutige Drucktücher können bei einer Nenndicke von 1,95 mm und einer Schnittkantenlänge  $< 1\,000$  mm eine Dickengenauigkeit von  $\pm 10\ \mu\text{m}$  erreichen [HER03b].

(b) Mechanische Eigenschaften: Die (relative) Zusammendrückbarkeit gibt das auf die Drucktuchdicke bezogene, prozentuale Maß an, um das sich das Drucktuch unter definierter, einaxialer Belastung in Dickenrichtung zusammendrücken lässt, und wird manchmal auch als Kompressibilität bezeichnet, obwohl diese Bezeichnung im strengen Sinne der Kompressibilität eines Materials nicht zutrifft. Anhand der Zusammendrückbarkeit kann die Grenze zwischen kompressibel und konventionell zahlenmäßig festgelegt werden, sodass Begriffe wie „halbkompressibel“ oder „superkompressibel“ entfallen. Dieser Grenzwert beträgt nach DIN 16 621 4,5 % bei  $100\ \text{N/cm}^2$  Belastung. Die Elastizität gibt das Kraft-Dehnungsverhalten des Drucktuchs bei Belastung in seiner Ebene an, wie dies beispielsweise beim Aufspannen des

Drucktuchs auftritt. Das Drucktuch soll in seiner Ebene eine bestimmte Reißfestigkeit aufweisen, die es vor Reißen innerhalb der Druckmaschine schützt. Je höher die Anzahl der Gewebeschichten ist, desto geringer dehnt sich das Drucktuch beim Aufspannen, desto weniger häufig muss es beim Drucken nachgespannt werden. Viele Gewebeschichten erhöhen allerdings die Biegesteifigkeit des Drucktuchs und verschlechtern seine Handhabung, z. B. beim Montieren in den Zylinderkanal. Die Rückstellzeit gibt an, wie schnell ein Drucktuch eine Eindrückung wieder abbaut, also sich von dem letzt gedruckten Bogen erholt. Die Dickenabnahme entsteht dann, wenn beim Aufspannen ein Drucktuch durch Querkontraktion an Dicke verliert. Im Gegensatz dazu impliziert das Setzen eine Dickenabnahme durch wiederholter Be- und Entlastung, wie dies im Auflagedruck auftritt. Außerdem werden für Drucktücher die Oberflächenrauigkeit der Deckschicht und die (Shore-)Härte ermittelt. Die Bezeichnung „hartes“ Drucktuch wird in der Praxis manchmal auch verwendet, um ein wenig zusammendrückbares Drucktuch anzudeuten. Die geometrischen und mechanischen Eigenschaften der bereits in Abbildung 2.1 gezeigten Drucktücher sind im Anhang 11.1 angegeben (Herstellerangaben).

(c) Drucktechnische Eigenschaften: Das Farbübertragungsverhalten gibt an, wie das Drucktuch Druckfarbe von der Druckplatte aufnimmt und an den Bogen abgibt. Dies beeinflusst die Gleichmäßigkeit von Vollflächen und die Tonwertzunahme bei Rasterflächen. Der Widerstand gegen Knautscher (eng.: smash) beschreibt das Vermögen eines Drucktuchs, den Eindruck, den der Durchgang eines Doppelbogens oder Fremdkörpers an der Deckschicht hinterlässt, wieder abzubauen. Der QR-Effekt (QR: Quick Release) beschreibt die Fähigkeit eines Drucktuchs, den Bedruckstoff nach Verlassen der Druckzone freizugeben. Dies wird u. a. durch die Klebekraft der Druckfarbe erschwert. Durch die Kontaktspannungen in der Berührzone zwischen Papier und Drucktuch, kann dieses insbesondere beim Rollenoffset die Papierbahn außerdem beschleunigen oder abbremsen. Dieses so genannte Förderverhalten beeinflusst die Papierbahnstabilität.

Aktuelle Informationen über die Eigenschaften heutiger Drucktücher sind u. a. in aktuellen Herstellerprospekten und auf den Herstellerwebseiten zu finden. Im Literaturverzeichnis sind die Internetadressen ausgewählter Drucktuchhersteller aufgeführt.

### 3.4 Normen

In der DIN 16 621 „Drucktücher für den indirekten Flachdruck (Offsetdruck)“ sind verschiedene Begriffsbestimmungen, Anforderungen, Kennzeichnungen zum Drucktuch sowie Testmethoden, u. a. zur Längsdehnung, Zusammendrückbarkeit und Quellbeständigkeit, festgelegt. Die Ermittlung des Kraft-Verformungs-Verhaltens von Drucktüchern in Druckrichtung erfolgt in Anlehnung an DIN 53 354. Es sei außerdem auf folgende Normen hingewiesen:

- ISO-Technische Komitee 130 Normvorschlag N 239: Empfehlungen zur Ermittlung der Eigenschaften von Mehrschicht-Drucktüchern.
- DIN 53 519: Härteprüfung (Nachfolgenorm: DIN ISO 48.)
- DIN 53 321: Quelluntersuchung zum Waschmittel (Nachfolgenorm: DIN ISO 23529.)
- DIN 53521: Bestimmung des Verhaltens von Elastomeren gegenüber Flüssigkeiten (Nachfolgenorm: DIN ISO 1817.)
- DIN 4768: Ermittlung der Rauheitskenngrößen.

### 3.5 Die klassischen Untersuchungen

#### 3.5.1 Untersuchung der Farbübertragung von Drucktüchern

Wie ein Drucktuch Druckfarbe beim Vollflächendruck aufnimmt und sie weiter an den Bedruckstoff abgibt, lässt sich an einem so genannten Probedruckgerät außerhalb der Druckmaschine elementar untersuchen, wie dies beispielsweise von Rech durchgeführt wurde [REC69]. In dem Probedruckgerät rollen Farbwalze und Drucktuch aufeinander ab. Die Farbwalze fördert eine Farbmenge (Farbangebot), die sich durch Abrollen jedoch nur teilweise auf das Drucktuch überträgt. Rech zeigte, dass die auf das Drucktuch übertragene Farbmenge mit zunehmendem Farbangebot anfangs zunimmt danach jedoch asymptotisch einem festen Wert annähert. Außerdem führt ein stärkerer Anpressdruck zwischen Farbwalze und Drucktuch zu höheren Farbübertragungsmengen.

#### 3.5.2 Messung der Druckverteilung zwischen Drucktuch und Papier

Messungen zur (Anpress-) Druckverteilung in der Berührzone zwischen Drucktuch und Papier wurden bereits in den 60er Jahren durchgeführt [DRU60]. Anhand von unmittelbar unter den Gummizylinderaufzug aufgebrachten Dehnungsmessstreifen,

die zwecks Signalauswertung an einen Oszilloskop über Schleifringe angekoppelt sind, konnten während des Auflagedrucks Amplitude und Verlauf des Anpressdrucks sowie die Länge der Berührzone gemessen werden. Variiert wurden dabei Druckgeschwindigkeit und Steifigkeit des Gummizylinderaufzugs. Es wurde bei einem Aufzug mit geringer Dickensteifigkeit (einem kompressiblen Drucktuch mit Drucktuchunterlage) ein statischer Anpressdruck von 0,12 MPa gemessen, der sich bei einer Druckgeschwindigkeit von 6 000 B/h auf 0,18 MPa erhöhte. Die Kontaktzonenlänge lag bei 8 mm und nahm bei höherer Druckgeschwindigkeit erst zu, dann wieder ab. Ein steife-rer Aufzug führte zu einer spitzeren Druckverteilung: die Amplitude lag bei 6 000 B/h bei 0,28 MPa, die Kontaktzonenlänge verringerte sich jedoch im Vergleich zum nachgiebigeren Aufzug auf 5 mm. Es konnte bei den untersuchten Drucktüchern unsym-metrische Druckverteilungen infolge viskoelastischer Effekte festgestellt werden. Außerdem konnte bei statistischen Messungen eine Schwankung im Anpressdruck festgestellt werden, die im Wesentlichen auf Schwankungen in der Papierdicke zu-rückgeführt wurde.

### 3.5.3 Drucktucheigenschaften und Marktübersicht

Schläpfer et. al veröffentlichten im Auftrag der UGRA einen Bericht über Markt und Bedeutung einiger Eigenschaften verschiedener Drucktücher [SCH72]. Dabei wurden rund 200 Drucktücher von verschiedenen Herstellern und Lieferanten untersucht. Etwa dreiviertel der Drucktücher waren konventionell. Interessant bei diesem Bericht sind insbesondere die verschiedenen Ebenen, die zur Untersuchung von Drucktucheigen-schaften definiert wurden und sich in ihrer Aussagekraft unterscheiden.

Nach Art der Herangehensweise können zwei Ebenen definiert werden:

- Eine praxisorientierte Drucktuchcharakterisierung. Sie gibt diejenigen Eigen-schaften an, die das Drucktuch für einen bestimmten Anwendungsbereich quali-fizieren, also z. B. Drucktuch für Bogenoffset, schnelllaufende Maschinen oder mit UV-Licht trocknende Druckfarben. Diese Beschreibung ist für die Druck-praxis von großer Relevanz, insbesondere bei der Drucktuchauswahl für einen bestimmten Druckauftrag, hat jedoch den Nachteil, dass sie keine quantitativen Aussagen über die Drucktucheigenschaften liefert.
- Eine werkstoffwissenschaftlich basierte Charakterisierung. Dabei wird das Drucktuch anhand von Materialparametern, z. B. Elastizität oder Härte, zahlen-mäßig beschrieben. Da es jedoch oft Korrelationen zwischen Materialparameter

und Druckergebnis fehlen, ist diese Beschreibungsart für die Druckpraxis von geringerer Bedeutung und wird dann herangezogen, wenn Drucktücher in Bezug auf einen bestimmten Materialparameter untereinander verglichen werden sollen.

Nach Ort der Untersuchung werden zwei Ebenen unterschieden:

- **Labormaßstab:** Die Drucktücher werden im Labor unter vereinfachten Betriebsbedingungen untersucht, wie z. B. bei Abwesenheit von Feuchtwasser. Es handelt sich somit um einen „modellbasierten Versuch“, der die interessierenden Merkmale des realen Druckprozesses nachbilden soll. Dies hat einerseits den Vorteil, dass sich für die Untersuchung meistens bessere Räumlichkeiten zur Aufbringung messtechnischer Einrichtungen ergeben als bei z. T. schwer zugänglichen Offsetdruckmaschinen. Da es sich andererseits um ein Modell handelt, besteht die Schwierigkeit, für die Realität repräsentative Betriebszustände zu definieren und die am Prüfstand gewonnen Erkenntnisse auf das reale System zu übertragen. Von Nachteil ist außerdem der mit dem Prüfstand verbundene konstruktive Aufwand.
- **Produktionsmaßstab:** Die Drucktücher werden in laufendem Produktionsbetrieb, also unter realen Druckbedingungen, untersucht, was die Aussagekraft der Untersuchung erhöht. Allerdings sind Versuche an einer Offsetdruckmaschine aufwändiger, allein bei der Bereitstellung aller erforderlichen Versuchsmaterialien und -hilfsstoffe. Offsetdruckmaschinen sind außerdem größer als ein Prüfstand, und die Einhaltung definierter Versuchsbedingungen kann sich recht aufwändig gestalten. Ein weiteres Problem stellt eine für den Versuch verfügbare Druckmaschine dar, die dann über die Versuchsdauer in der Produktion nicht einsetzbar ist.

Nach Gegenstand der Untersuchung werden zwei Ebenen zur Charakterisierung von Drucktüchern definiert:

- **Charakterisierung des Drucktuchs** anhand der Eigenschaften der Rohstoffe (Komponenten), aus denen es zusammengesetzt ist. Die Drucktucheigenschaften lassen sich auf dieser Weise elementar und getrennt voneinander in Labormaßstab untersuchen, z. B. die Untersuchung des Quellverhaltens der Deckschicht oder des Spannverhaltens der Gewebeschichten. Bei einer gelungenen Korrelation zwischen Drucktuchkomponente und Druckergebnis, können die Drucktuchkomponenten einzeln optimiert werden. Von Nachteil ist jedoch die Nichtbe-

rücksichtigung der Veränderungen, die mit der Drucktuchfertigung und dem Druckvorgang in den Eigenschaften der Drucktuchkomponenten einfließen.

- Charakterisierung des Drucktuchs im gebrauchsfertigen Zustand, also als Ganzes, entweder in Labor- oder auch Produktionsmaßstab. So können Drucktuchproben z. B. in Bezug auf Farbabgabeverhalten oder Zugfestigkeit in einem Probendruckgerät bzw. Zugprüfmaschine untersucht werden. Allerdings sorgt das Zusammenkommen verschiedener Drucktuchkomponenten für ein komplexes, u. U. schwer identifizierbares Werkstoffverhalten.

In demselben Bericht wurde außerdem auf die Kompressibilität, Elastizität, Härte und Oberflächenrauigkeit von Drucktüchern eingegangen, wonach kompressible Drucktücher Dickenschwankungen besser ausgleichen können als inkompressible. Diese sind jedoch in der Lage, eine für die Farbübertragung ausreichend hohe Druckspannung bereits bei geringen Eindrückungen und Kontaktlängen aufzubauen, und sorgen damit für eine schärfere Punktübertragung. Es wurden viskoelastische Eigenschaften des Drucktuchs in Dickenrichtung erkannt. Der Druckzyklus wurde in zwei Abschnitte eingeteilt: die einige Millisekunden dauernde Belastungszeit, in der das Drucktuch eine Kontaktzone passiert und dabei zusammengedrückt wird, und die einige Zehntelsekunden dauernde Erholungszeit, in der das Drucktuch die Zusammendrückung wieder abbaut. Eine geringe Längsdehnung des Drucktuchs wirkt sich positiv auf die Rasterpunktübertragung, da dadurch Schubverformungen in der Kontaktzone begrenzt werden. Die Längsdehnung wurde im Zugversuch in jenem Bereich ermittelt, in dem die Drucktuchdehnung im Montagezustand liegt. Für die Übertragung feiner Bildelemente wurde eine glatte, geschlossene Gummioberflächenstruktur bevorzugt. Eine allzu glatte Oberfläche begünstigt jedoch die Anziehungskraft zwischen Gummi, Druckfarbe und Papier und kann die Farbübertragung durch Rupferscheinungen verschlechtern. Der QR-Effekt (vgl. Seite 28) wurde nur qualitativ beschrieben.

Kurze Marktübersichten über Drucktücher werden bis heute ab und wieder veröffentlicht, insbesondere in den einschlägigen Zeitschriften sowie in Zusammenhang mit der DRUPA-Messe.



#### **3.5.4 Messung der Zylinderkräfte zwischen Platten-, Gummi- und Druckzylinder**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 3.213 der AiF „Erfassung der Prozessvariablen an Gummituch und Aufzug“ haben Kettinger et al. die Radial- und Tangentialkraft untersucht, die aus den Normal- und Schubspannungen im Kontaktbereich zwischen Druckplatte und -tuch bzw. Drucktuch und Bogen resultieren [KET75a]. Diese Kräfte wurden mittels Dehnungsmessstreifen gemessen, die an den Platten-, Gummi- und Druckzylinderlagern einer Bogenoffsetdruckmaschine aufgebracht wurden. Lagerkräfte am Platten- bzw. Druckzylinder rühren aus dem Kontakt zwischen Druckplatte und -tuch bzw. Drucktuch und Papier her und addieren sich an den Gummizylinderlagern zusammen. Werden nun die Druckzylinderlagerkräfte betrachtet, so konnte nachgewiesen werden, dass die Radialkraftkomponente beim Kanaldurchgang Gummi-/Druckzylinder abnimmt. Aber auch der Kanaldurchgang Platten-/Gummizylinder lockert die Normalspannung zwischen Drucktuch und Papier und führt ebenfalls zu geringerer Radialkraft. Kurz vor einem Kanalbeginn konnte nachgewiesen werden, dass die Radialkraft zunimmt, weil das Drucktuch durch Abrollen immer stärker nach hinten gewälzt wird und entsprechend stärker gegen Druckplatte bzw. Papier drückt. Durch Variation der Papierpressung konnte außerdem nachgewiesen werden, dass die Radialkraft bei der einen und selben Zylinderwinkellage progressiv mit der Papierpressung ansteigt. Dieser Zusammenhang bestand gleichermaßen bei konventionellen wie bei Luftpolsterdrucktüchern. Die ermittelten Radial- und Tangentialkräfte lagen für das Bogenformat 110 x 160 cm bei einigen kN. Im Gegenteil zur Radialkraft wurde die Tangentialkraft nicht an den Druck- sondern an den Gummizylinderlagern gemessen. Die Tangentialkraft verläuft ähnlich der Radialkraft, d. h. sie nimmt zu bzw. ab, jedes mal ein Kanal anfängt bzw. endet, mit dem Unterschied, dass mit fortschreitendem Walken die Tangentialkraft nicht zunimmt, sondern sogar abnimmt, da das Walken dafür sorgt, dass der Gummizylinderdurchmesser den des Druckzylinders nachholt und somit ein True Rolling Zustand immer näher rückt.

#### **3.5.5 Messung der Bogendeformation beim Passieren der Kontaktzone Drucktuch-Bogen**

In einem weiteren Aufsatz untersuchten Kettinger et al. den Einfluss der Druckbeistellung auf die Bogendeformation [KET75b]. Sie gingen von einer absoluten zu einer relativen Messung der Bogendeformation über (Differenzmessung), die sich auf einem

so genannten Bezugsbogen bezieht, um klimatische Einflüsse auszuschalten. Der Bezugsbogen wurde dabei mit der kleinsten Druckbeistellung gedruckt. Zur Messung der Bogendeformation wurde ein FOGRA-Nonius-Messelement mit einer Auflösung von 1  $\mu\text{m}$  verwendet. Dieses besteht aus einer Grundskala, die vor dem Drucken bereits auf den Bogen aufgebracht wurde, und einer Messskala, die unmittelbar neben der Grundskala aufgedruckt wird. Die Bogendeformation, die während des Druckens geschieht, resultiert dann aus dem Vergleich der Längen beider Skalen. Die Druckversuche wurden an einer Bogenoffsetdruckmaschine durchgeführt. Ausgewertet wurden für verschiedene Druckbeistellungen jeweils fünf unmittelbar nacheinander gedruckte Bogen. Es konnte am Beispiel eines konventionellen Drucktuchs gezeigt werden, dass sich der Bogen mit zunehmender Druckbeistellung zunächst immer stärker verkürzt. Diese Verkürzung nimmt jedoch ab einer bestimmten Druckbeistellung wieder ab und verschwindet, um dann in eine Bogenverlängerung überzugehen. Der Wechsel von Bogenverkürzung zu -verlängerung wurde auf der Basis der Abwickelverhältnisse zwischen Drucktuch und Bogen begründet. Haben nämlich Drucktuch und Bogen vor Berührung die gleiche Länge, so wird das Drucktuch mit zunehmender Druckbeistellung zunächst zusammengedrückt, seine Oberfläche wird kürzer als die des Bogens. Durch Wulstbildung gleichen sich jedoch Drucktuch- und Bogenlänge wieder aus. Steigt die Druckbeistellung weiter, so wird die Drucktuchoberfläche durch die stärkere Wulstbildung länger. Die Unterschiede in der Drucktuch- und Bogenlänge rufen in der Druckzone Schubspannungen hervor, die zu einer Bogenverkürzung bzw. -verlängerung führen.

Die Bogendeformation wurde an mehreren Stellen des Bogens gemessen, sodass die Bogengeometrie im deformierten Zustand rekonstruiert werden konnte. Es konnte im Versuch gezeigt werden, dass die Bogendeformation am hinteren Bogenrand am größten ist, d. h. der Bogen wälzt sich von der Greiferkante nach hinten ab, wobei die Bogenlängung in Bogenmitte größer ist als an den Bogenseiten.

### **3.5.6 Die „Vergleichenden Gummituch-Untersuchungen“**

In den „Vergleichenden Gummituch-Untersuchungen“ führte Laubmann Druckversuche zum mechanisch-drucktechnischen Verhalten von Drucktüchern durch [FOG77a, b]. Zehn Drucktücher mit unterschiedlichen Aufbauten und Oberflächenbeschaffenheiten, wurden im Labor sowie an einer Bogenoffsetdruckmaschine in Bezug auf Härte, Zusammendrückbarkeit, aufgebaute Druckspannung, QR-Effekt, Farbüber-

tragungsverhalten, Dickenabnahme, Einfluss des Anspannmoments, Tonwertzunahme, Einfluss der Eindrückung zwischen Druckplatte, Drucktuch und Papier, Gleichmäßigkeit des Ausdrucks bei Linienraster sowie Widerstand gegen Knautscher miteinander verglichen. Laubmann setzte bei seinen Versuchen Messgeräte zur Erfassung der Versuchsbedingungen Farbwerkstemperatur, Farbschichtdicke und -zügigkeit, Wassermenge auf der Druckplatte, Klima im Versuchsraum sowie Feuchtmittelzusammensetzung ein. Gedruckte Bogen wurden erst dann ausgewertet, wenn die erfassten Versuchsbedingungen innerhalb eines bestimmten Toleranzbereichs lagen. Als Druckplatte wurde eine Testform mit Raster-, Vollton- und Linienfeldern zur Feststellung der Volltondichte und Tonwertzunahme sowie zur visuellen Beurteilung der Gleichmäßigkeit im Druck eingesetzt, und es wurde densitometrisch ausgewertet. Die Druckversuche zeigten, wie sich unterschiedliche Drucktücher beim Drucken in Bezug auf bestimmte Eigenschaften auch unterschiedlich verhalten. Unter gleichen Versuchsbedingungen lieferten die Drucktücher Farbdichten zwischen 1,46 und 1,82. Die Tonwertzunahme im Mittelton lag zwischen 14 % und 20 %. Außerdem konnten große Unterschiede in Zusammendrückbarkeit, Shore-Härte A und Widerstand gegen Knautscher festgestellt werden.

Die „Vergleichenden Gummituch-Untersuchungen“ stießen im Fachkreis auf große Resonanz und stellten eine Orientierungshilfe für Praktiker bei der Drucktuchauswahl aus der unüberschaubaren Anzahl der auf dem Markt befindlichen Drucktüchern (rund 200 Sorten aus verschiedenen Herstellern und Lieferanten) dar. Vergleichende Drucktuchuntersuchungen führten später ebenfalls Heine und Pöller durch, jedoch für den Endlosformulardruck und in einem größeren Eindrückungsbereich zwischen Druckplatte und Drucktuch (0,1 mm bis 0,3 mm) [HEI88].

### **3.5.7 Untersuchung der Bogenqualität und dynamischen Eigenschaften von Offsetpapier**

Falter widmete sich den dynamischen und drucktechnischen Eigenschaften von Offsetpapier [FAL82]. Er ging auf das Problem der bleibenden Papierverformung im Druckspalt sowie durch Bogentransport in der Druckmaschine ein. Als typische Bogenzugkraft gab er für gestrichenes Papier einen Wert von 7 bis 10 N je Zentimeter Bogenbreite an. Er führte Versuche durch, die sowohl auf Labor- als auch Produktionsmaßstab basierten. Im Labor untersuchte er das dynamische Kraft-Dehnungsverhalten von Papier (bis 400 Hz) und zeigte durch die Periodizität der resultierenden

Ergebnisse, wie sich bei Massenpapieren die Bogen der einen und selben Papierlieferung – bedingt durch das Papierherstellungsverfahren – unterscheiden können (mehrere Rollen mit u. U. verschiedenen mechanischen Eigenschaften werden aus Wirtschaftlichkeitsgründen parallel am Querscheider geschnitten). Er nutzte diesen Effekt, um später bei Druckversuchen zu zeigen, dass das Dublieren auch papierbedingt sein kann, da es in der gleichen Periodizität auftritt, wie die Schwankungen im Kraft-Dehnungs-Verhalten einzelner Bogen.

### **3.5.8 Untersuchung der Drucktucheigenschaften und Druckqualität**

Den Einfluss der Drucktucheigenschaften auf die Druckqualität im Zeitungsdruck hat Fuchs experimentell untersucht und setzte bei der Beurteilung der Druckergebnisse sowohl objektive (Densitometrie und Bildanalyse) als auch subjektive Mittel ein (visuelle Beurteilung durch Prüfungsgremium, also „der Eindruck des Fachmanns“) [FUC94]. Bestandteil der Untersuchung waren auch der Waschmitteleinfluss sowie der Perlenefekt (Anhäufen von Druckfarbe, das sie auf Vollflächen als perlenförmige Bereiche erscheinen lässt), worauf an dieser Stelle nicht eingegangen wird. Alle untersuchten Drucktücher waren für den Zeitungsdruck bestimmt und hatten einerseits unterschiedliche Zusammendrückbarkeit, andererseits – bei gleichem Aufbau – unterschiedliche Oberflächenstruktur und -härte. Bei der experimentellen Ermittlung der Zusammendrückbarkeit wurden zwei Verfahren eingesetzt: Stempelversuch mit gespannter und ungespannter Probe. Beide Verfahren erwiesen sich als nicht äquivalent, da sie bedingt durch die unterschiedlichen Lasten und Randbedingungen sowie die Nichtlinearität im Materialverhalten dafür sorgen, dass die Zusammendrückbarkeit beim Wechseln von dem einen zum anderen Prüfverfahren je nach Drucktuch zu- oder abnehmen kann. Ein von der FOGRA vorgeschlagene Verfahren zur dynamischen Ermittlung der Zusammendrückbarkeit, mit dem übrigens auch die Rückstellraten experimentell bestimmbar seien, wurde nicht eingesetzt, da es in der Praxis wenige Messplätze dafür gebe [FUC94]. Die Drucktuchoberflächenrauigkeit wurde mittels Perthometers gemessen, wobei sich für die Längs- und Querrichtung bei geschliffenen Deckschichten deutlich, bei gegossenen jedoch kaum unterschiedliche Werte ergaben. Für die Druckversuche wurde ein (faktorieller)  $2 \times 2 \times 2$  Mehreinflussversuch vorgesehen, bei dem die Einflussfaktoren Zusammendrückbarkeit, Oberflächenrauigkeit und -härte einen dreidimensionalen Raum spannen und jeweils zwei Zustände annehmen können, z. B. für die Oberflächenhärte „hart“ oder „weich“. Bildlich würde auf

dieser Weise ein würfelförmiger Versuchsraum entstehen, auf dessen Ecken Drucktücher sitzen mit extremalen Eigenschaften. Die Druckversuche wurden an einer Labor- und einer Produktionsrollenoffsetdruckmaschine durchgeführt. Es wurde versucht, einerseits eine Korrelation zwischen den Einflussfaktoren und dem Druckergebnis herzustellen, und andererseits durch Vergleich der Druckergebnisse festzustellen, ob Ergebnisse der Labordruckmaschine für den Produktionsmaßstab repräsentativ wären. Die Druckversuche wurden derart durchgeführt, dass für jedes Drucktuch eine Farbdichte von 1,1 (Farbe: schwarz) zuerst eingestellt wurde, ehe Ausdrücke zur Auswertung gezogen wurden, was dazu führte, dass Farb- und Wasserführung ständig auf das jeweilige Drucktuch angepasst werden mussten. Für jeden Druckversuch wurden 50 Druckexemplare densitometrisch ausgewertet, für die Bildanalyse wurde jedoch für jeden Versuch ein einziger Rasterpunkt auf Flächendeckung hin analysiert, sodass keine statistisch abgesicherten Aussagen möglich waren. Es konnte anhand einer Korrelationsmatrix gezeigt werden, dass die Laborkennwerte Zusammendrückbarkeit, Oberflächenrauigkeit und -härte mit den Kriterien Tonwertzuwachs, Druckkontrast und subjektiver Druckbeurteilung gut korrelieren. Außerdem lieferten die Labor- und Produktionsdruckversuche vergleichbare Ergebnisse. In dieser Hinsicht wären also (für die untersuchten Zeitungsdrucktücher und Kriterien) sowohl die Laborkennwerte als auch die Labordruckversuche für die Produktion repräsentativ.

Untersuchungen zur Tonwertzunahme in Abhängigkeit des Drucktuchs führen ebenfalls Druckmaschinenhersteller regelmäßig durch, wie beispielsweise die Druckversuche von Augsburg und Stock (MAN Roland, Offenbach), bei denen für vier Druckfarben zehn Drucktücher hinsichtlich Tonwertzunahme miteinander verglichen wurden [AUG95]. Außerdem wurden Tests zu Kraft-Verformungs-Verhalten, statischer und dynamischer Zusammendrückung (mit Temperaturvariierung) sowie Quellverhalten durchgeführt. Die untersuchten Drucktücher lieferten für die Farbe Cyan bei gleichen Druckbedingungen Tonwertzunahmen im Mittelton von 5 % bis 16 %. Die Farbdichten lagen im Vollton zwischen 1,37 bis 1,5, wobei die Drucktücher mit der kleinsten bzw. höchsten Tonwertzunahme die gleiche Farbdichte von 1,42 aufwiesen.

### **3.6 Das „Gummituch-Symposium“**

Interessante Untersuchungen zu den mechanisch-drucktechnischen Eigenschaften von Drucktüchern wurden ebenfalls im Rahmen des FOGRA-IARIAI-Symposiums über Druckkennlinien und Drucktücher vorgestellt, an dem zahlreiche Drucktuch-, Druck-

maschinenhersteller und Druckpraktiker Vorträge hielten [FOG78]. Das Symposium wird zwar ebenfalls den klassischen Untersuchungen zugeordnet, jedoch hier zwecks besserer Übersicht in einem separaten Abschnitt beschrieben. Die dabei vorgetragenen Arbeiten seien im Folgenden kurz dargestellt.

### 3.6.1 Untersuchung der Druckabwicklung

Heyne (IGT, Amsterdam) referierte über eine experimentelle Arbeit zum Erfassen und Korrelieren der für die Druckabwicklung relevanten Parameter. Seine Untersuchung wurde auch in [HEY75] dokumentiert. Er konnte in seinem Versuch zeigen, dass konventionelle Drucktücher weniger Eindrückung benötigen als kompressible, um einen bestimmten Anpressdruck aufzubauen. Die Shore-Härte konnte bei vorgegebenem Anpressdruck mit der Eindrückung nicht in Korrelation gebracht werden. Gingen Kettinger et al. bei der oben beschriebenen Arbeit bei allen untersuchten Drucktüchern von der Eindrückung aus, um die resultierenden Zylinderlagerkräfte zu ermitteln (Wegsteuerung), so beschritt Heyne in seiner Arbeit den entgegen gesetzten Weg. Er ermittelte nämlich für verschiedene Drucktücher die Eindrückungen, die für den Aufbau eines bestimmten Anpressdrucks ( $80 \text{ N/mm}^2$ ) erforderlich sind (Kraftsteuerung). Er fand dabei, dass kompressible Drucktücher im Vergleich zu den konventionellen durch die höhere erforderliche Eindrückung den Plattenzylinder in einer längeren Kontaktzone berühren und somit bei gleichem Soll-Anpressdruck größere Zylinderlagerkräfte verursachen. Dies wird jedoch in Praxis in Kauf genommen, um Abweichungen in der Drucktuchdicke und im Zylinderrundlauf sowie die Oberflächenstruktur des Bedruckstoffs (z. B. bei gekörntem Papier) besser ausgleichen zu können. Heyne erstellte außerdem an einem Prüfstand für verschiedene Drucktücher die so genannten Abwicklungskennlinien. Der Prüfstand bestand aus aufeinander abrollenden Platten- und Gummizylinder, wobei der eine Zylinder wahlweise den anderen treibt oder von ihm über Reibung mitgenommen wird. Der Prüfstand ermöglichte, verschiedene Eindrückungen unabhängig von den Zylinderdurchmessern einzustellen, da die Zylinder schmitzringfrei laufen. Das Drucktuch wurde unterschiedlich hoch aufgezogen, und es wurde diejenige Eindrückung ermittelt, bei der ein True Rolling Zustand entsteht. Dieser wurde an einem Übersetzungsverhältnis gleich 1 zwischen treibendem und angetriebenem Zylinder erkannt. Wird die Eindrückung in Abhängigkeit der Differenz zwischen Gummi- und Plattenzylinderdurchmessern aufgetragen, so entsteht die Abwicklungskennlinie, die für jedes Drucktuch spezifisch ist. Abwick-

lungskennlinien können verschiedene Verläufe annehmen, Wendepunkte aufweisen und sogar Knicke enthalten. Sie geben also Auskunft über die Eindrückung, die eingestellt werden soll, wenn Platten- und Drucktuchdurchmesser vorgegeben sind und ein True Rolling Zustand angestrebt wird. Sie zeigen außerdem das bevorzugte Einsatzgebiet eines Drucktuchs an. Liegt z. B. die Abwicklungskennlinie überwiegend in dem Bereich, in dem der Durchmesser des Drucktuchs kleiner ist als der des Plattenzylinders, so zeigt dies die Eignung des Drucktuchs für dicke Bedruckstoffe, wenn am Prüfstand der Platten- in die Rolle des Druckzylinders versetzt wird.

### **3.6.2 Prüfmethoden für Drucktücher**

Loibl (FOGRA, München) referierte über Prüfmethoden zur Kennzeichnung von Drucktüchern. Er erwähnte den großen Mangel, der bei der Definition geeigneter Kennwerte für Drucktücher existierte, im Gegensatz zu Druckfarben und Bedruckstoffen. Es wurden daher die Bedeutung einiger Kennwerte und deren Zusammenhang mit dem Druckergebnis untersucht. Für verschiedene Drucktücher wurden die Zusammendrückbarkeit und die Shore-Härte ermittelt, ohne dass dabei eine Korrelation zwischen den beiden Kennwerten festgestellt werden konnte. Außerdem wurde die Shore-Härte für Drucktücher als wenig sinnvoll betrachtet, da sie für homogene Proben bestimmt ist.

Basierten die oben beschriebenen Arbeiten von Kettinger et al. auf rein mechanischer Betrachtung, die versuchte, das drucktechnische Verhalten von Drucktüchern durch die aus der Abrollung resultierenden Kräfte zu beschreiben, so führte Loibl Druckversuche durch, mit denen der Einfluss der Zusammendrückbarkeit und Druckzylinderbeistellung auf die Rastertonwertzunahme im Mittelton ermittelt wurde. Hauptziel war dabei, die drucktechnischen Eigenschaften von Drucktüchern anhand der Zusammendrückbarkeit im Voraus zu bestimmen.

Es konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Zusammendrückbarkeit und Rastertonwertzunahme ermittelt werden. Bei gleicher Druckbeistellung führten kompressible Drucktücher im Vergleich zu den konventionellen zu geringerer Rastertonwertzunahme. Andererseits nahm diese für das gleiche Drucktuch mit steigender Druckzylinderbeistellung zu. Eine Verdoppelung der Zusammendrückbarkeit führte bei geringer Druckzylinderbeistellung zur Erhöhung der Rastertonwertzunahme um etwa 5 %, bei höheren Druckzylinderstellungen um einen noch größeren Betrag (über 10 %). Konventionelle Drucktücher reagierten stärker auf die Druckbeistellung als Luftpolster-

drucktücher. Mit diesen konnte außerdem beim Flächendruck ein visuell gleichmäßigerer Ausdruck erzielt werden als mit den konventionellen.

Loibl konnte außerdem den Einfluss der Drucktuchoberflächenrauigkeit auf das Druckergebnis zeigen, wonach bei der Auswahl einer geeigneten Oberflächenrauigkeit stets ein Kompromiss zwischen guter Farbübertragung, scharfer Rasterpunktform und gutem QR-Effekt zu treffen ist.

### **3.6.3 Drucktücher und Praxiserfahrungen**

Zimmerer berichtete über praktische Erfahrungen mit Drucktüchern im Bogenoffset. Er sah die Notwendigkeit vergleichender Untersuchungen bei Drucktüchern, um dem Drucker eine Hilfestellung bei der Auswahl eines für einen bestimmten Druckauftrag geeigneten Drucktuchs zu leisten, und schlug dazu einen Versuchsplan vor. Dieser berücksichtigte die Tatsache, dass zwecks Vergleichbarkeit die Drucktücher nicht „zwischendurch“ während eines Fortdrucks getestet werden sollen, sondern nach einer einheitlichen Vorgehensweise.

### **3.6.4 Eigenschaften von Drucktüchern für den Rollenoffset**

Haefeker (Axel Springer, Hamburg) ging auf die Eigenschaften von Drucktüchern für den Zeitungsdruck ein, insbesondere auf die Rückstellzeit. Wegen der im Vergleich zum Bogenoffset höheren Geschwindigkeiten kommt dieser Eigenschaft beim Rollenoffset eine große Bedeutung zu. Außerdem betonte Haefeker die Notwendigkeit, die Funktionsweise des Drucktuchs und seine Wechselwirkungen mit all ihn berührenden Elementen (Druckplatte, Bedruckstoff usw.) systematisch zu untersuchen und statt Handelsnamen geeignete technische Kenngrößen zur Charakterisierung von Drucktüchern zu definieren.

### **3.6.5 Berechnungsmodell nach Stöckel**

Stöckl (MAN Roland, Augsburg) erstellte ein Rechenprogramm, mit dem die durch den Kanaldurchgang induzierten Schwingungen berechnet werden können. Gegenstand der Berechnung war ein schnelllaufendes Rollenoffsetdruckwerk (20 000 U/h) in Gummi-gegen-Gummi-Bauweise. Die Zylinder wurden als nichtprismatische Biegebalken aufgefasst. Lager, Schmitzringe und Drucktuch wurden als Feder- und Dämpferelemente abgebildet, die die Zylinder elastisch einbetten. Gezeigt haben die Berechnungen insbesondere den Einfluss der Zusammendrückbarkeit des Drucktuchs



sowie die Schmitzringvorspannung auf Schwingungsentstehung und -ausmaß sowie auf die Streifenbildung im Druckbild.

### **3.6.6 Optimale Druckabwicklung**

Uhrig (Heidelberger Druckmaschinen, Heidelberg) untersuchte (ähnlich Heyne) an einem Prüfstand mit zwei aufeinander abrollenden Zylindern und bei Anwesenheit von Druckfarbe und Feuchtmittel die optimale Druckabwicklung (True Rolling Zustand) für drei Drucktücher mit steigender Zusammendrückbarkeit. Er gab Richtwerte für die entsprechenden Eindrückungen und Drucktuchhöhen an, wobei der Prüfstand jeweils im Abroll- (der eine Zylinder treibt, der andere wird durch Friktion mitgenommen) und Kraftflussmodus (beide Zylinder zwangsgetrieben) betrieben werden konnte.

### **3.6.7 Drucktuchaufbau und Beurteilungskriterien**

Spöringer (Continental, Northeim) fasste in seinem Referat die Beurteilungskriterien für ein Drucktuch zusammen und gab Hinweise darüber, welches Element des Drucktuchs (Deckschicht, Unterbau etc.) diese Kriterien hauptsächlich bestimmt. Er ging auf die geringe Aussagekraft von Laborkennwerten (Shore-Härte, Dehnung etc.) und auf die Gefahr ein, den Drucker vor dem Einsatz eines neuen Drucktuchs durch die Ermittlung der vielen Kennwerte zu überfordern. Er schlug vor, die Laborkennwerte auch durch Druckversuche zu ergänzen, die die Aussagen über Druckqualität und Eignung eines Drucktuchs für ein bestimmtes Einsatzgebiet erst absichern.

Hinweise zum Herstellungsverfahren von Drucktüchern gab Löser (Phönix-Werke, Hamburg) in seinem Referat, insbesondere zur Zusammensetzung und Vorbereitung von Festigkeits- und Deckschicht sowie zum Vulkanisationsverfahren.

### **3.6.8 Abschätzung der Druckspannung**

Marschner (Birkner & Kandelbinder, Eching) verwendete in seinem Referat über Kennzeichnung des Zylinderaufzugs einfache Formeln, mit der die für die Farbübertragung relevante Druckspannung abgeschätzt werden kann. Diese auch in vielen anderen Arbeiten zu findenden Formeln tragen zwar den kinematischen Kenngrößen Zylinderdurchmesser und Beistellung Rechnung, berücksichtigen jedoch keine Stoffeigenschaften.

### **3.6.9 Einfluss des Waschmittels**

Schläpfer (EMPA/UGRA, St. Gallen) bzw. Laubscher (Albert Frankenthal, Frankenthal) berichteten über den Einfluss des Waschmittels auf das Quellverhalten von Drucktüchern sowie über die Konstruktion von Drucktuchspannsystemen. Sie erwähnten die durch die Spanntechnik hervorgerufene Ungleichmäßigkeit der Drucktuchdicke (Sicheleffekt), worauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

### **3.6.10 Entwicklungstendenzen von Drucktüchern**

Zum Abschluss des Drucktuchsymposiums gab Marks (Ernst Marks, Mühlheim) Hinweise zu möglichen zukünftigen Entwicklungstendenzen von Drucktüchern, wonach insbesondere neue Drucktuchaufbauten, die beispielsweise ohne Gewebeschichten auskommen, sowie eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Qualität von Drucktüchern zu erwarten seien.

Textauszüge aus den einzelnen Referaten des Symposiums wurden auch in [FOG79] veröffentlicht. Nach der Beschreibung der klassischen Untersuchungen folgen in den nächsten Abschnitten die materialwissenschaftlich orientierten Arbeiten.

## **3.7 Abrollvorgänge und Materialmodelle**

### **3.7.1 Allgemeine Walzenkontakte bei Gummielastizität**

Zum Thema „Berechnung viskoelastischer Walzenkontakte“ mit Gummi-Gummi- oder Gummi-Stahl-Kontaktpaaren existieren zahlreiche Arbeiten sowohl mit Bezug zum Druckmaschinenbau als auch mit allgemeinem Hintergrund. Darunter haben nur vereinzelte Arbeiten Bezug zum Drucktuch. Eine Zusammenstellung relevanter Untersuchungen zum erwähnten Thema bis 1975 ist beispielsweise in den Dissertationen von Pfeiffer und Glück [PFE70], [GLÜ76] zu finden. Neure Untersuchungen sind in den Dissertationen von Hammele und Michel angegeben [HAM97], [MIC99]. Zu den neueren Veröffentlichungen über Viskoelastizität gehören die Arbeiten von Phan-Thien sowie Han et al. [PHA02], [HAN03]. Arbeiten auf dem Gebiet allgemeiner Abrollkontaktprobleme sind beispielsweise bei Braat zitiert [BRA93]. Erwähnenswert ist außerdem die Zusammenstellung von Mackerle über Gummimaterialien mit Verweis auf rund 500 Arbeiten der Jahre 1997 bis 2003 zu Gummielastizität, Materialeigenschaften, Kontaktproblemen, Strukturanalyse, numerischer Simulation aber auch Verfahrenstechnik und Bruchmechanik. Die Zusammenstellung von Mackerle basiert

auf einer Auswertung der Datenbanken MAKEBASE, INSPEC und COMPENDEX [MAC04].

### **3.7.2 Viskoelastische Walzenkontakte bei Druckmaschinen nach Pfeiffer und Glück**

Die Arbeit von Pfeiffer gehört zu den wichtigsten rechnerischen und experimentellen Untersuchungen des viskoelastischen Walzenkontakts bei Druckmaschinen [PFE70]. Pfeiffer versuchte, über einer morphologischen Betrachtung Walzenkontakte bei Druckmaschinen zu einem übergeordneten, mehrparametrischen Modell zusammenzuführen, dem so genannten elementaren Rollsystem, aus dem sich alle weiteren Walzenkontakte durch geeignete Wahl der Modellparameter lösen lassen. Dies betrifft also prinzipiell auch Abrollvorgänge bei Drucktöchern. Dieses Metamodell besteht zunächst aus zwei Walzen mit glatten, trocknen Oberflächen und liefert eine Grundlösung, die sich beispielsweise durch Berücksichtigung der zwischen den beiden Walzen laufenden Papierbahn oder geführten Druckfarbe als neuen Modellparameters modifizieren lässt. Außerdem enthält die Arbeit ausführliche Beschreibungen zur experimentellen Ermittlung viskoelastischer Werkstoffparameter, insbesondere Speicher- und Verlustmodul von homogenen Gummiwalzenbezügen, die als Presseur, Farbwalze oder Papierführungsrollen zum Einsatz kommen.

Glück behandelte die Abrollvorgänge bei viskoelastischen Walzen in Offsetfarbwerken [GLÜ76]. Er konnte dabei Anpressdruck und viskoelastisches Moment rechnerisch ermitteln und anhand eines Modellwalzenfarbwerks experimentell verifizieren.

### **3.7.3 Das „erste“ Materialmodell für Drucktöcher**

Die Untersuchung von Loibl et. al. ist wahrscheinlich die erste Arbeit zum mechanisch-drucktechnischen Verhalten von Drucktöchern mit ausgeprägt tieferem werkstoffwissenschaftlichem Hintergrund als bei noch früheren Untersuchungen. Sie wurde begleitend zu den „Vergleichenden Gummituch-Untersuchungen“ durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.5.6), ging über einen „Waretest“ hinaus und versuchte, „die Ergebnisse der Druckversuche mit denen der Laboruntersuchungen zu verknüpfen und Beziehungen herzustellen“, um „die umfangreichen Druckversuche durch einfachere und wesentlich billigere Laboruntersuchungen zu ersetzen“ [FOG77c]. Folgende Untersuchungsebenen wurden dabei zugrunde gelegt:

- Praxisorientierte Ebene. Bei der Beurteilung eines Drucktuchs wurde von zwei Kriterien ausgegangen: die mechanischen und die drucktechnischen Eigenschaften. Physikalische und chemische Eigenschaften wurden nicht berücksichtigt. Im Einzelnen handelte es sich um folgende Eigenschaften:  
Mechanisch: Dehnungs-, Querkontraktions-, Setz-, Biegeverhalten, Reibung, Abrieb und Reißfestigkeit.  
Drucktechnisch: Minimale Druckspannung, Gleichmäßigkeit des Ausdrucks, Rastertonwert- und Farbübertragung, Knautscherwiderstand, Schiebeempfindlichkeit und Adhäsion zum Druckträger (QR-Effekt).
- Materialwissenschaftliche Ebene. Zur quantifizierten Beschreibung der in der praxisorientierten Ebene definierten Eigenschaften wurden folgende Materialkennwerte identifiziert: Längsdehnung, Querdehnzahl, Zugfestigkeit, Dickenabnahme, Zusammendrückung bzw. Dickenelastizität, viskoelastisches Moment, Biegesteifigkeit, Reibungskoeffizienten, Abriebmenge, Oberflächenrauigkeit, Bogenabzugshöhe und Farbübertragungsfaktor.
- Versuchsorientierte Ebene: Geeignete Druckversuche sollten den Zusammenhang zwischen der praxisorientierten und der materialwissenschaftlichen Ebene zeigen.

Im Originaltext wurden bestimmte Begriffe sowohl für Eigenschaften als auch für Materialkennwerte verwendet, z. B. „Farbübertragung“. Um Verwechslungen zu vermeiden, wurden diese Begriffe bei der obigen Aufführung entweder genauer spezifiziert oder durch andere äquivalente Bezeichnung ersetzt. Im Folgenden seien die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung kurz dargestellt.

Für die Längsdehnung wurde im Montagezustand ein typischer Wert von 2 % bis 3,5 % angegeben. Je mehr Gewebeschichten ein Drucktuch enthält, desto geringer ist die Längsdehnung bei gleicher Spannkraft. Die Querkontraktionszahl, ermittelt im Zugversuch durch Belasten in Druckrichtung, lag in Dickenrichtung bei 0,4 bis 0,9 und in Querrichtung (Zylinderachsrichtung) bei 0,2 bis 0,8. Das Setzen wurde dynamisch bei 100 Hz und nach 100 Belastungszyklen ermittelt und lieferte einen typischen Wert von 3,2 %. Die Biegesteifigkeit, die die Handhabung und das Einspannverhalten des Drucktuchs im Zylinderkanal sowie die Intensität des Kanalschlags (Ansetzen des Kontakts nach Kanaldurchgang) mitbestimmt, wurde an einem Taber-Messgerät ermittelt, bei dem der Biegradius eines Drucktuchstreifens unter vorgege-

bener Last bestimmen lässt. Außerdem wird die Biegesteifigkeit von der Anzahl der Gewebeschichten und deren Anordnung in Drucktuchdickenrichtung beeinflusst. Die Reibkoeffizienten wurden nach Haller et al. experimentell bestimmt [HAL76]. Das Abriebverhalten wurde durch Abschleifen einer Deckschichtprobe gegen rotierende Scheibe geprüft (Taber-Abraser) und ergab für die untersuchten Drucktücher keine signifikanten Gummiabtragsmengen. Das Setzverhalten eines Drucktuchs wurde auf den Dickenverlust durch bleibende Gummi- und Gewebeverformungen sowie auf viskoelastische Effekte, die ein Rückfedern der Deckschicht verlangsamt, zurückgeführt. Die Zusammendrückbarkeit wurde am Stempelversuch im Rund-gegen-flach-Prinzip (Stempel zylindrisch, Drucktuchstreifen flach) nach 100 Belastungszyklen geprüft. Wird die Stempelkraft in Abhängigkeit der Stempeleindrückung aufgetragen, jeweils bei Be- und Entlastung, so resultiert die so genannte Federkennlinie, die im Allgemeinen eine geschwindigkeitsabhängige Hystereseform aufweist. Eine Abnahme der Zusammendrückbarkeit durch zunehmende Probenvorspannung wurde beobachtet. Es konnten Zusammenhänge zwischen Zusammendrückbarkeit und minimaler Druckspannung, Gleichmäßigkeit des Ausdrucks sowie Rastertonwertübertragung festgestellt werden: Je höherer die Zusammendrückbarkeit eines Drucktuchs ist, desto weniger Spannung wird bei einer gerade ordentlichen Farbübertragung benötigt. Die minimale Druckspannung lag bei konventionellen bzw. kompressiblen Drucktüchern bei 2 MPa bzw. 0,80 MPa. Außerdem führte eine höhere Zusammendrückbarkeit zu besserer Gleichmäßigkeit des Ausdrucks und – für die eine und selbe Eindrückung – zu geringerer Rastertonwertzunahme. Die Dickenelastizität eines Drucktuchs wurde durch Linearisierung der Federkennlinie ermittelt. Gegenüber der Zusammendrückbarkeit hat sie den Vorteil, den Charakter eines Elastizitätsmoduls zu besitzen. Sie steht in proportionalem Zusammenhang mit dem Widerstand eines Drucktuchs gegen Knautscher. Das viskoelastische Moment entsteht durch unsymmetrische Druckspannungsverteilung in der Zylinderberührzone. Es wurde auf der Basis der unterschiedlichen Be- und Entlastungsäste der quasistatischen Federkennlinie ermittelt, sodass dynamische Einflüsse nicht berücksichtigt wurden. Dieses Moment steht zusammen mit den Reibungskoeffizienten und der Eindrückung in Zusammenhang mit der Empfindlichkeit eines Drucktuchs gegenüber Schieben. Bei viskoelastischem Moment kleiner 3,5 Ncm pro cm Drucktuchbreite bzw. größer 4,5 Ncm/cm waren Drucktücher weniger, bei Werten um 4 Ncm/cm stärker schiebeempfindlich. Eine analytische

Beschreibung dieses Effekts wurde nicht angegeben, dafür jedoch folgende Begründung:

Der Zusammenhang zwischen Schieben, viskoelastischem Moment und Reibung in der Zylinderberührzone wurde auf das Verhältnis der Reibkraft (hervorgerufen durch die Eindrückung) zu den Tangentialkräften (hervorgerufen durch das viskoelastische Moment) zurückgeführt. Bei leichter Eindrückung ist die Reibkraft gering. Besitzt das Drucktuch außerdem ein kleines viskoelastisches Moment, so ist die daraus resultierende Tangentialkraft ebenfalls gering und somit auch die Deformation der Drucktuchoberfläche. In der Zylinderberührzone herrscht überwiegend haften, und das Drucktuch zeigt sich als scheibeunempfindlich. Zur experimentellen Erfassung des Schiebeausmaßes wurde der Rastertonwertunterschied an den Schiebemarken zugrunde gelegt. Steigt das viskoelastische Moment an (dafür wird ein geeignetes Drucktuch benötigt), so sind Tangential- und Reibkraft nicht mehr in Gleichgewicht. Gleiten nimmt zu, wodurch sich die Deformation der Drucktuchoberfläche und das Schieben erhöhen. Bei noch größerem viskoelastischem Moment verschwindet die Haftzone, die Drucktuchoberfläche entspannt sich durch das rein Gleiten und das Schieben nimmt wieder ab. Eine weitere Steigung des viskoelastischen Moments würde die Tangentialkräfte und somit die Deformation der Drucktuchoberfläche erhöhen und das Schieben erneut verstärken.

Im Abschluss des Forschungsberichts ist eine Zusammenfassung der experimentell ermittelten Materialkennwerte für die untersuchten Drucktücher tabellarisch angegeben.

#### **3.7.4 Millersche Bedingungen**

Miller beschrieb zwei Arten von Schlupf, die in der Kontaktzone auftreten und sich negativ auf das Druckbild auswirken: einem Schlupf, der aus unterschiedlichen Geschwindigkeiten der aufeinander abrollenden Oberflächen resultiert, und einem Mikroschlupf, der auch im True Rolling Zustand auftritt und auf Dehnungsunterschiede benachbarter Oberflächenpunkte zurückzuführen ist [MIL69]. Miller stellte darauf basierend eine Bedingung für eine gute Rasterpunktübertragung auf, die besagt:

#### Millersche Bedingung I:

Eine hohe Rasterpunktschärfe wird beim Drucken dann erreicht, wenn die Dehnung der Drucktuchoberfläche sich innerhalb der Kontaktzone mit Druckplatte bzw. Bedruckstoff örtlich nicht verändere.

An einem Abrollprüfstand mit Gummi- und Gegendruckzylinder untersuchte Miller außerdem das Übersetzungsverhältnis für die beiden Fälle, dass das Drucktuch den Gegendruckzylinder durch Reibung treibt und umgekehrt. Es konnte gezeigt werden, dass es Drucktücher gibt, sogar konventionellen Aufbaus, bei denen in beiden Fällen nahezu das gleiche Übersetzungsverhältnis resultiert, und dies unabhängig von der Eindrückung und der Druckgeschwindigkeit. Für solche Drucktücher wurde eine unabhängig von der Eindrückung und Druckgeschwindigkeit gute Rasterpunktübertragung vorausgesagt, woraus eine weitere Bedingung abgeleitet werden kann:

#### Millersche Bedingung II:

Bedingung für eine gute Rasterpunktübertragung ist ein am Abrollprüfstand für ermitteltes Übersetzungsverhältnis, das unabhängig ist von der Auswahl des treibenden Zylinders, der Eindrückung und der Druckgeschwindigkeit.

### 3.7.5 Untersuchung zum True Rolling

Analog zu Miller untersuchte Hansen (INGRAF) theoretisch und experimentell den True Rolling Zustand zwischen Druckplatte und Drucktuch sowie Drucktuch und Bogen [HAN79]. Er konnte durch begleitende Druckversuche und Auswertung des Schiebefelds Beziehungen herleiten, die den Bereich des True Rolling in Abhängigkeit von Druckplatten- und Drucktuchüberstand spezifizieren. Er definierte außerdem eine rein kinematische Größe  $\mathcal{E}$ , die die relative Veränderung der Drucktuchumfangslänge (in Promille) in Abhängigkeit der Zylinderdurchmesser und -winkelgeschwindigkeit beschreibt, und zeigte, dass diese Größe für bestimmte Eindrückungen und je nach Drucktuch negativ (Kontraktion) bzw. positiv (Dehnung der Drucktuchoberfläche im Kontaktbereich) werden kann. An einem Abrollprüfstand konnte gezeigt werden, dass  $\mathcal{E}$  unterschiedliche Werte annimmt, je nach dem ob der Gummizylinder antreibt oder von dem Gegendruckzylinder durch Friktion mitgenommen wird.

### 3.7.6 Förderverhalten

Schaschek et al. (Koenig & Bauer, Würzburg) untersuchten die dynamischen Abwickeleigenschaften und deren Bezug zum Förderverhalten/True Rolling von schnelllaufenden Rollenoffsetdrucktüchern [SCH01]. Dabei wurde die Berührzone (eng.: Nip) zwischen (starrer) Druckplatte und (verformbarem) Drucktuch als ortsfesten, sich durch die Eindrückung einengenden Kontrollraum betrachtet, durch den das „Drucktuchmaterial“ beim Abrollen strömt. Basierend auf Geschwindigkeit und Volumen des hinein- und herausströmenden Materials (Kontinuitätsgleichung) wurde für das System Platten-/Gummizylinder das Übersetzungsverhältnis abgeleitet. Dieses geht nicht von den Nenndurchmessern aus, sondern trägt dem durch Eindrückung und Materialverhalten verkleinerten oder vergrößerten Gummizylinderdurchmesser (dem effektiven Durchmesser) Rechnung. Im Hinblick auf das Materialverhalten wurden zwei Grenzfälle unterschieden: ein ideal kompressibles und ein ideal inkompressibles Material. Für beide Materialien variiert das Übersetzungsverhältnis mit der Eindrückung linear (Grenzkennlinien). Abrollversuche zeigten, dass bei (realen) Drucktüchern die Übersetzungs-Eindrückungs-Kennlinien zwischen den Grenzkennlinien liegen. Wird nun das Übersetzungsverhältnis auf die Grenzkennlinien bezogen, so resultiert der so genannte  $\alpha$ -Wert, der von Zylinderdurchmesser und Eindrückung unabhängig ist und als einen, jedem Drucktuch in Bezug auf Übersetzung/Förderverhalten charakteristischen Kennwert angesehen werden kann. Der  $\alpha$ -Wert liegt zwischen 0 (ideal inkompressibel) und 1 (ideal kompressibel).

Die viskoelastischen Eigenschaften von Drucktüchern wurden in [SCH05] untersucht. Dabei wurde die Drucktuchdeformation in einen elastischen und einen viskosen Anteil aufgeteilt. Erster ist bei großen Deformationen nichtlinear, bestimmt die Flächenpressung (Farbübertrag) im Nip und beeinflusst die Zylinderdurchbiegung. Letzter hängt von der Verformungsgeschwindigkeit ab und bestimmt Walkarbeit (Wärmeentwicklung) und Schwingungsdämpfung (Zylinderkanaldurchgang). Die experimentelle Untersuchung beider Anteile erfolgte am servodynamischen Stempelprüfstand, wobei verschiedene, vorgespannte Drucktücher durch weggesteuerte, zyklische Eindrückung belastet wurden, woraus Höhe und Verlauf der Stempelkraft resultierte. Elastische (Speichermodul) und viskose Kenngrößen (Verlustmodul, Dämpfungsfaktor) ergeben sich aus der Phasenverschiebung zwischen Eindrückung und Stempelkraft. Im Gegensatz zum Speichermodul hängt der Verlustmodul stark von der Belastungsfrequenz ab.



Gebrauchte Drucktücher zeigten höhere Verlustmodule als neue auf. Ferner wurde die Bremswirkung der viskosen Kräfte (Walkarbeit) anhand von Austrudelversuchen ermittelt, wobei die Walkarbeit eine starke Abhängigkeit von der Belastungsfrequenz bis etwa 40 000 B/h (entspricht bei einem Niplänge-Zylinderumfangs-Verhältnis von 1:100 einer Nipfrequenz von ca. 1 kHz) zeigte.

### **3.8 Numerische Lösungsverfahren, Simulation**

#### **3.8.1 Berechnung des Abrollvorgangs mit durchgehender Papierbahn**

Soong und Li (Xerox, Rochester/USA) veröffentlichten zwei Untersuchungen zur Druckspannungsverteilung im eben betrachteten, reibungsbehafteten Kontaktbereich zwischen zwei Gummiwalzen und einer stationär durchlaufenden Papierbahn, wie dies in Digitaldruckmaschinen zur Druckbildfixierung oder Bedruckstofftransport eingesetzt wird [SOO80], [SOO81]. Als Lösungsansatz diente eine Spannungsfunktion. Die Normal- und Schubspannungen wurden als Fourier-Reihen aufgestellt und unter Berücksichtigung von Stoffgesetz und Randbedingungen (keine Verschiebungen am inneren Rand der Gummibezüge) mittels Kollokationsverfahren (eng.: point-matching) iterativ ermittelt, bei dem die Kontaktzone in eine Anzahl von Punkten eingeteilt wird, die sich wieder innerhalb der Kontaktzone bewegen dürfen, sobald die an ihnen berechnete Schubspannung dem Produkt aus Haftreibungskoeffizienten und Kontaktnormalspannung übersteigt. Papier und Gummibezug wurden dabei als isotrop und linear elastisch angenommen. Papier behalte außerdem beim Passieren der Druckzone seine Ausgangsdicke und habe keine Biegesteifigkeit. Je nachdem, ob die Papierbahn durch den Druckspalt befördert oder durch eine zusätzliche Bahnzugkraft gezogen wird, wurde eine symmetrische bzw. asymmetrische Druckverteilung errechnet.

#### **3.8.2 Berechnung des Abrollvorgangs bei Walzen mit geschichtetem Bezug mit der Randelement-Methode (BEM)**

Braat (Technische Universität Delft in Zusammenarbeit mit der Firma Océ Niederlande) erstellte in seiner Dissertation ein auf der Randelement-Methode basiertes Rechenprogramm (MULTILAYER) zur Lösung des als zweidimensional aufgefassten, reibungsbehafteten Abrollproblems bei zwangsgetriebenen viskoelastischen Walzen mit mehrschichtigem Bezug und Hauptanwendung in Digitaldruckmaschinen [BRA93]. Sein Programm (Rechner: DEC2000/120 Workstation) beinhaltete im Hinblick auf effizientere numerischere Umsetzung einige Modifikationen der Algorithmen

NORM und TANG von Kalker, bei denen die Kontaktnormal- und -tangentialspannungen iterativ gelöst werden [KAL91]. Verschiebungen und Spannungen im Kontaktbereich hängen über so genannte Einflussfunktionen (Green-Funktionen) zusammen, die auch die Stoffeigenschaften beinhalten. Diese Funktionen wurden aufgrund der mit der Viskoelastizität verbundenen Faltungsintegrale unter Annahme stationärer Randbedingungen im Fourier-Bereich ermittelt (Korrespondenz-Prinzip) und wieder in den Zeitbereich numerisch rücktransformiert (Software: MAPLE). Zur Validierung seiner Rechenergebnisse führte Braat Vergleichsrechnungen zu bekannten Lösungen durch, wie z. B. der Eindrückung eines starren Zylinders in eine dünne elastische Schicht nach Meijers oder Johnson [MEI68], [JOH85]. Außerdem setzte er die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA-Verfahren) in Kombination mit durchsichtigen Walzen und Gummibezügen ein, um die Geschwindigkeit der durch den Kontaktbereich strömenden Gummioberfläche zu messen. Das LDA-Verfahren beruht auf dem Prinzip, dass zwei Laserstrahlen auf die Messstelle fokussiert werden. Die Partikelgeschwindigkeit lässt sich aus der Lichtstreuung ermitteln, die durch ein das Schnittvolumen beider Laserstrahlen durchquerendes Materialpartikel erzeugt wird [DUR81], [TRO06].

### **3.8.3 Berechnung des Abrollvorgangs mit Berücksichtigung der Druckfargeigenschaften mit der Randelement-Methode**

Bohan et al. setzten ebenfalls die Randelement-Methode ein, um die Kontaktnormalspannung beim schlupfbehafteten, „feuchten“ Abrollvorgang mit einer Gummi-, einer Stahlwalze und einem dazwischen befindlichen Farbfilm zu berechnen [BOH97], [BOH98]. Insbesondere wurde der Einfluss der Walzengeschwindigkeit auf die Normalspannungsverteilung und Farbfilmstärke in der Kontaktzone aufgezeigt. Die Untersuchung orientiert sich stark an elastohydrodynamischen Problemstellungen, wie sie im Offsetfarb- und -lackierwerken vorkommen.

### **3.8.4 Lösung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM)**

Moderne Untersuchungen zu den mechanisch-drucktechnischen Eigenschaften von Drucktüchern setzen Computersimulation ein, um Druckvorgänge zu analysieren. Michel simulierte den Abrollvorgang mit Drucktuch, Druckfarbe und Bogen mit dem FEM-Programm Marc/Mentat (Rechner: SGI Origin 2), analysierte dabei das Schieben sowie den QR-Effekt und führte zur Validierung der rechnerischen Simulation

Druckversuche an einer Bogenoffsetdruckmaschine durch [MIC99]. Das Drucktuch betrachtete er als orthotropes, linear viskoelastisches Material, dessen Parameter im Rahmen einer umfangreichen Werkstoffprüfung charakterisiert wurden. Einzelne Schichten des Drucktuchs wurden nicht berücksichtigt, sodass ein homogenisierendes Modell entsteht, das sich in seinem Aufbau danach richtet, wie sich das Drucktuch insgesamt verhält. Das linear viskoelastische Materialmodell bestand aus einem verallgemeinerten Maxwell-Körper. Rheologisch gesehen kann dieser als  $n$  parallel geschaltete einfache Maxwell-Körper veranschaulicht werden, die ihrerseits jeweils aus einem Feder- und einem Dämpferelement in Hintereinanderschaltung bestehen. Im eindimensionalen Fall werden Feder und Dämpfer durch Federkonstante bzw. Dämpfungsfaktor charakterisiert, für einen dreidimensionalen, orthotropen Körper gehen diese Konstanten in einen zeitabhängigen Elastizitätstensor über, dessen Komponenten  $G_{ijkl}$  mittels dehnungsgesteuerter Zug- und Schubversuche bei erzwungener harmonischer Belastung und vorgespannter Probe identifiziert wurden. Die Belastungsfrequenz lag dabei in gleicher Größenordnung wie jene Frequenz, mit der ein Teilchen aus der Oberfläche des Drucktuchs eine Kontaktzone passiert, also im Bereich 1 bis etwa 200 Hz für Druckgeschwindigkeiten bis 5 000 B/h. Die Frequenz wurde derart variiert, dass die Tensorkomponenten  $G_{ijkl}$  mittels geeigneter Fitting-Prozedur als Summe gewichteter Exponentialfunktionen (in vielen FEM-Codes wie Abaqus und Marc als so genannte Prony-Serie implementiert) mit Koeffizienten  $G_{ijkl,n}$  und Relaxationszeiten  $\lambda_n$  vorliegen, mit  $n \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  (entsprechend der Anzahl der geschalteten einfachen Maxwell-Körper). Das Papier wurde als orthotropes, linear elastisches Material aufgefasst und lediglich in Bezug auf Zugeigenschaften in und quer zur Druckrichtung geprüft. Die restlichen Materialparameter wurden angenommen oder der Literatur entnommen.

Die Druckfarbe, die durch ihre Klebekraft das Ablösen des Bogens von der Drucktuchoberfläche nach Verlassen des Druckspalts erschwert, wurde mit Federelementen mit nichtlinearer Kennlinie modelliert, die die Drucktuchoberfläche und den Bogen verbinden. Die charakteristische Kraft-Weg-Kennlinie wurde an einem Tackmeter bestimmt.

Die Reibungszahlen zwischen Drucktuch und Druckplatte sowie Drucktuch und Papier wurden an einem Prüfstand druck- und geschwindigkeitsabhängig ermittelt. Der Berechnung des reibungsbehafteten Abrollvorgangs mit Drucktuch, Druckfarbe, Bo-

gen und Druckzylinder lagen ein zweidimensionales FEM-Modell mit der Annahme eines ebenen Verzerrungszustands sowie Gummi- und Druckzylinderausschnitte von  $60^\circ$  zugrunde. Der Einfluss von Drucktuchdicke, -überstand, -vorspannung, Eindrückung zwischen Drucktuch und Bogen und Druckgeschwindigkeit auf die Druckspannungsverteilung zwischen Drucktuch und Bogen, das Schieben sowie den QR-Effekt konnte mittels der FEM-Simulation numerisch ermittelt und durch die Druckversuche validiert werden.

### **3.9 Thermomechanische Eigenschaften von Drucktüchern**

Zur abrollbedingten Wärmeentwicklung bei einem Drucktuch und ihrem Einfluss auf die Druckabwicklung ist wenig bekannt (siehe z. B. [MIL69].) Es sei außerdem auf die Temperaturabhängigkeit der Relaxationszeit viskoelastischer Materialien hingewiesen.

### **3.10 Hyper- und Schaumelastizität**

Bei großen Eindrückungen treten im Drucktuch große Deformationen auf, deren elastischer Anteil sich anhand hyper- und schaumelastischer Materialmodelle beschreiben lässt. Zahlreiche hyperelastische Materialmodelle sind in den letzten Jahrzehnten vorgeschlagen worden, die sich hauptsächlich auf das Verhalten isotroper, nahezu inkompressibler Materialien (Querdehnzahl  $\approx 0,5$ ) konzentrieren. Sie können in phänomenologische und physikalisch begründete Materialmodelle, eingeteilt werden. Erste wurden auf Basis des makroskopisch wahrnehmbaren Werkstoffverhaltens aufgestellt, letzte versuchen, Hyperelastizität durch Struktur und Beweglichkeit der polymeren Molekülketten zu beschreiben. Auf beide Modellarten sei im Folgenden kurz eingegangen.

#### **3.10.1 Phänomenologische hyperelastische Materialmodelle**

Phänomenologische hyperelastische Materialmodelle postulieren die Existenz einer Verzerrungsenergie, die als Funktion der Hauptinvarianten des rechten Cauchy-Green-Verzerrungstensors (wegen der finiten elastischen Deformationen) ausgedrückt wird. Dazu gehören die Modelle nach Ogden, Rivlin und Ciarlet, die beispielsweise in der Dissertation von Johannknecht sowie in der Dokumentation kommerzieller FEM-Codes beschrieben sind [JOH99], [ABQ06]. Als Verzerrungsenergiefunktionen kom-

men Polynome (mit vielen) sowie exponentielle Abbildungen (mit wenigeren Materialkoeffizienten) zum Einsatz [LÜR01].

Johannknecht führte an HNBR-Gummiprobe (HNBR: Hydrogenated Acrylonitrile-Butadiene Rubber) einaxiale, äquibiaxiale und Schubversuche sowie isobare Kompressionsversuche durch. Die resultierenden Materialantworten (Kurven mit nomineller Spannung als Funktion der nominellen Dehnung bzw. Streckung) setzte er zur Kalibrierung verschiedener Materialmodelle ein und zeigte, wie diese sich einerseits in der Simulation der experimentell ermittelten Kurven, andererseits in der Voraussage weiterer komplexerer Belastungsfälle unterscheiden. Deshalb sollen Materialparameter bei hyperelastischen Materialmodellen zur Erhöhung der Modellvoraussagekraft bei beliebig kombinierter Belastung anhand möglichst mehrerer elementarer Versuche bestimmt werden.

### **3.10.2 Hyperelastisches Materialmodell bei Anisotropie**

Hyperelastizität bei Anisotropie hat z. B. Lürding in ihrer Dissertation behandelt [LÜR01]. Sie erweiterte eine auf exponentieller Abbildung basierende Verzerrungsenergiefunktion, die ursprünglich für isotrope Materialien entwickelt wurde, auf den orthotropen Fall und implementierte die Funktion in ein FEM-Programm (FEMAS 2000), um Schalenstrukturen zu berechnen. Leider ist anisotrope Hyperelastizität, die sich beim Drucktuch aus dem Zusammenwirken von Gewebe, Elastomer und Schichtenaufbau ergibt, in vielen FEM-Programmen (u. a. zurzeit in Abaqus) nicht implementiert.

### **3.10.3 Makromolekular basierte hyperelastische Materialmodelle**

Zu diesen Modellen gehört z. B. das Modell von Bergström und Boyce, das sowohl das hyperelastische als auch das Hysterese-Verhalten von Elastomeren bei zyklischer Belastung abbilden kann [BER98], [BER01]. Dieses Modell ist u. a. auch in das FEM-Programm Abaqus implementiert [ABQ06].

### **3.10.4 Schaumelastische Materialmodelle**

Wie bei der Hyperelastizität lassen sich für schaumelastische Materialien, bei denen die Querdehnzahl jedoch deutlich kleiner als 0,5 ist, Verzerrungsenergiefunktionen definieren, worauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird und auf die Fachliteratur verwiesen sei (siehe z. B. [CHA98], [SHR05]).

### 3.11 Stempelproblem

Die Ermittlung der Zusammendrückbarkeit bzw. der Federkennlinie eines Drucktuchs erfolgt in der Regel im Labor durch Belasten einer vorgespannten, rechteckigen Probe mithilfe eines Stempels, meistens mit flacher Grundfläche. Um die Form der mit dem Drucktuch in Kontakt befindlichen Plattenzylinder Rechnung zu tragen, kommen mitunter auch runde Stempelformen zum Einsatz.

Für das Stempelproblem existieren heute in der Elastizitätstheorie unter der Annahme kleiner Verformungen Näherungslösungen für homogene, linear elastische, isotrope Materialien sowohl für Halbräume, also relativ tiefe Proben (z. B. die Lösung nach Hertz), als auch für dünne Medien, wie dies z. B. in der Monografie von Alexandrov und Pozhazkii für verschiedene Stempelformen (flach, zylindrisch, sphärisch) ausführlich dargestellt ist [ALE02].

### 3.12 Mikroskopische Rastervermessung

Neben der densitometrischen Auswertung von Rasterflächen können durch Mikroskopie Rasterpunkte einzeln betrachtet und ausgemessen werden, wie dies von Lind und MacPhee vorgeschlagen wurde [LIN00]. Diese haben Rasterpunkte einer gedruckten Rasterfläche mikroskopiert und setzten die Software Adobe Photoshop ein, um für das in Graustufen konvertierte Mikrobild ein Histogramm aufzustellen. Dieses beinhaltet die Häufigkeit (Anzahl der Pixel), mit der bestimmte, diskrete Grauwerte auftreten. Daraus folgt ein Histogramm mit zwei ausgeprägten Höhepunkten (Höckern): einem Punkt bei hellen (nicht gedruckter Bildbereich) und einem bei dunklen Grauwerten (gedruckter Bildbereich). Das Histogramm erreicht zwischen den beiden Höhepunkten ein Minimum, über das die Flächendeckung abschätzen lässt.

### 3.13 Fazit

Die Literatur ist reich an Untersuchungen theoretischer, rechnerischer und experimenteller Art zum mechanisch-drucktechnischen Verhalten von Drucktüchern. Experimente können im Labor in Form elementarer Tests, an der Produktionsdruckmaschine in Form von Druckversuchen sowie an einem den Druckprozess abbildenden Prüfstand, insbesondere am Abrollprüfstand, durchgeführt werden. Heute ist Vieles darüber bekannt, wie die mechanischen und drucktechnischen Drucktucheigenschaften miteinander und mit der Druckqualität zusammenhängen. Schwierigkeiten bestehen jedoch weiterhin bezüglich folgender Punkte:

- Druckversuche sind nach wie vor der eigentliche Weg, mit dem das wahre Bild über das Verhalten eines Drucktuchs innerhalb der Druckmaschine ermitteln lässt. Sie sind allerdings zeitlich und kostenmäßig sehr aufwändig.
- Moderne Untersuchungsmethoden, wie beispielsweise die rechnergestützte Simulation, bieten eine Ergänzung dazu. Die immer leistungsfähiger werden den Rechenanlagen ermöglichen, immer komplexere Materialmodelle zu berechnen. Von diesem Sachverhalt kann das Drucktuch heute aufgrund wenig oder gar nicht untersuchter Teilaspekte nur zum Teil profitieren. Unbekannt sind beispielsweise Untersuchungen zur Hyper- bzw. Schaumelastizität beim Drucktuch, dreidimensionale Drucktuchmodelle, mit denen der Druckvorgang recht detailliert abgebildet werden kann, sowie differenzierende (statt homogenisierende) Drucktuchmodelle, die den Laminataufbau und die damit verbundenen Anisotropie berücksichtigen. Mit dem Problem von fehlenden, klaren Vorstellungen über das Werkstoff- und Betriebsverhalten von Druckmaschinenkomponenten ist die ganze Drucktechnik aufgrund ihrer „schwierigen“ Materialien (Druckfarbe, Papier, Lack u. a.) konfrontiert.





## **4 Motivation, Zielsetzung und Aufgabenstellung**

### **4.1 Motivation**

Die vorliegende Arbeit war dadurch motiviert, die Berechnungsgrundlagen für das Offset-Druckwerk im Allgemeinen und für Drucktücher im Speziellen zu erweitern, um dadurch neue Wege zu schaffen, mit denen die Einsatzmöglichkeiten und -bedingungen von Drucktüchern auf rationaler Basis erweitert bzw. optimiert werden können. Wie bereits in den letzten Abschnitten aufgeführt, ist das mechanische Drucktuchverhalten in Dickenrichtung im Hinblick auf sein drucktechnisches Verhalten von großer Bedeutung. Da andererseits die Dicke heutiger Drucktücher gering ist, ist der Bauraum sehr begrenzt, in dem umfangreiche konstruktive Lösung (z. B. zur Erreichung eines ganz definierten Anpressdrucks oder Anpressdruckverlaufs) verwirklicht werden können. Die Drucktuchoptimierung über den Werkstoff alleine erfordert das Verständnis des Werkstoffverhaltens und dessen Bezugs zur Drucktuchfunktion. Aussagekräftige, umfassende, modellbasierte Rechenmodelle zu Werkstoff, Zusammensetzung und Funktion von Drucktüchern wären in dieser Hinsicht von großem Stellenwert und stellen darüber hinaus eine wichtige Grundlage für Regelalgorithmen moderner Druckmaschinen dar.

### **4.2 Zielsetzung**

Anhand modellbasierter Beschreibung des mechanischen und drucktechnischen Drucktuchverhaltens und Validierung der Modellansätze durch Experimente an Labor- und Produktionsmaßstab sollen die bereits von vielen früheren Untersuchungen hoch geschätzten Querverbindungen zwischen Theorie und Druckpraxis, also zwischen der materialwissenschaftlichen und der Anwendungsebene, weiter verstärkt werden. Aspekte, die in bisherigen Untersuchungen nur am Rande dargestellt wurden, werden im Rahmen dieser Arbeit in Richtung einer umfassenden Beschreibung des mechanisch-drucktechnischen Verhaltens eines Drucktuchs detailliert behandelt, insbesondere die elastomerbedingte Materialnichtlinearität, wie sie bei der Deck- und Luftpolsterschicht vorkommt.

### **4.3 Aufgabenstellung**

Die vorliegende Arbeit kann in zwei Teile gegliedert werden: einen Berechnungsteil mit einer numerischen Simulation der mechanischen und drucktechnischen Druck-

tucheigenschaften und einen experimentellen Teil mit einer Reihe von Druckversuchen.

Im ersten Teil soll ein Rechenmodell erstellt werden, das Aufbau und Werkstoffverhalten beim Drucktuch räumlich abbildet. Das Modell soll insbesondere große elastische Verformungen, die ein Drucktuch beim Zusammendrücken erfährt sowie die material- und strukturbedingte (Laminataufbau) Richtungsabhängigkeit des Drucktuchverhaltens berücksichtigen können. Zur Charakterisierung des Materialverhaltens einzelner Drucktuchbestandteile bzw. des gesamten Drucktuchs sollen möglichst die in der Praxis etablierten Standardversuche Zugversuch, Stempelversuch und Abrolltest herangezogen werden. Das Rechenmodell soll anschließend eingesetzt werden, um die dreidimensionale Abrollung von Druckplatte und Drucktuch und somit das drucktechnische Drucktuchverhalten mit dem FEM-Programm Abaqus zu simulieren. Der Einfluss der Abrollung von Drucktuch und Bogen wird im Rahmen der Simulation nicht behandelt.

Im experimentellen Aufgabenteil sind Druckversuche im Produktionsmaßstab durchzuführen, mit denen der Einfluss des Drucktuchaufbaus auf die drucktechnischen Drucktucheigenschaften, insbesondere auf das Rasterpunktübertragungsverhalten, gezeigt werden kann. Die experimentellen Ergebnisse werden zum Vergleich mit den Simulationsergebnissen verwendet.

#### **4.4 Drucktuchauswahl**

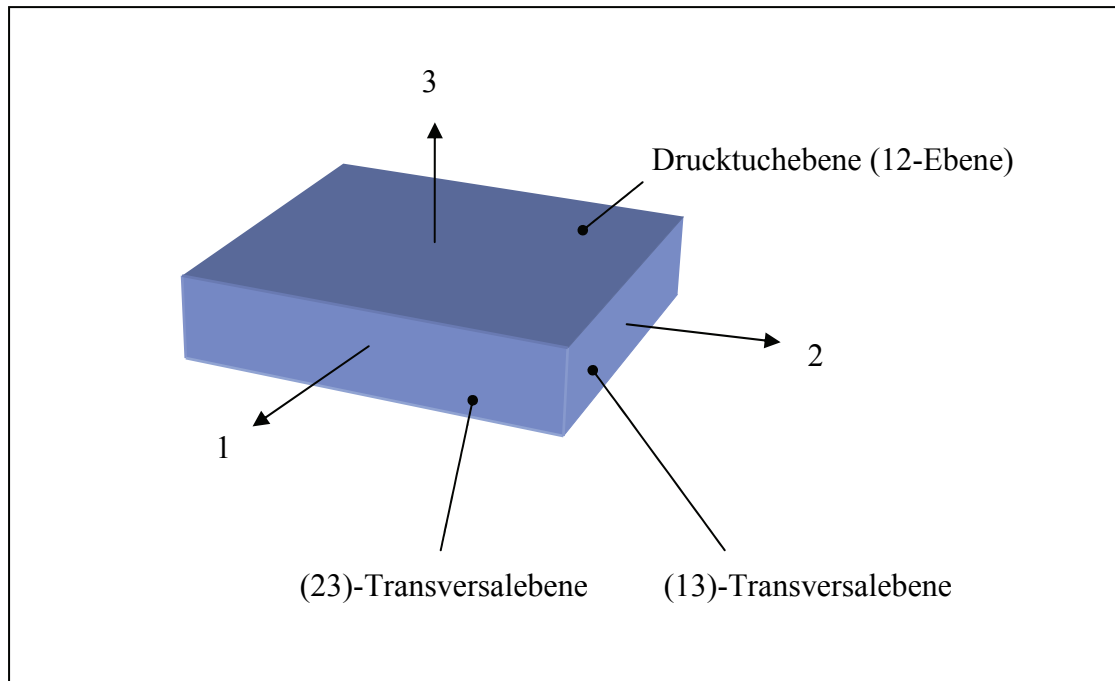
Bei der vorliegenden Aufgabe erfolgen die numerischen und experimentellen Untersuchungen am Beispiel folgender Drucktücher (s. Abbildung 3.1):

- Konventionelles Drucktuch (Opal, Firma Phoenix Xtra Print),
- Luftpolsterdrucktuch für den Bogenoffset (Sapphire, Firma Phoenix Xtra Print) sowie
- Luftpolsterdrucktuch für den Rollenoffset (FSR TR, Firma ContiTech, TR: True Rolling).

Ein Vergleich der Drucktücher im Sinne eines Produkttests ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da die Drucktücher für verschiedene Einsatzgebiete ausgelegt sind. Die Untersuchung erfolgt insofern auf Basis des unterschiedlichen Aufbaus und mechanischen Verhaltens.

#### 4.5 Richtungs- und Ebenenbezeichnungen

Würde die Dicke des Drucktuchs im Vergleich zu dessen Länge und Breite vernachlässigt werden, so könnte das Drucktuch als ein zweidimensionales Gebilde idealisiert werden. Drucktuchober- und -unterseite ließen sich dann zusammenlegen und als Drucktuchebene bezeichnen, Abbildung 4.1.



**Abbildung 4.1:** Richtungs- und Ebenenbezeichnungen beim Drucktuch.

Die Richtung mit der höchsten Zugsteifigkeit in Drucktuchebene wird als 1-Richtung bezeichnet und entspricht der Richtung, in der die Kettfäden der Festigkeitsschicht verlaufen und das Drucktuch auf den Gummizylinder gespannt wird. Synonyme für die 1-Richtung sind deshalb 0°-, Kett-, Spann-, Zylinderumfangs-, Bogenlauf- oder Druckrichtung. Die Richtung in der Drucktuchebene quer zur 1-Richtung wird als 2-, Schuss- oder Zylinderachsrichtung bezeichnet. Die Normale zur Drucktuchebene bildet die 3- oder Dickenrichtung.

Die 1-Richtung wird als positiv betrachtet, wenn sie in jene Richtung weist, in der das Drucktuch gegen Druckplatte oder Bogen abrollt. Die 3-Richtung ist dann positiv, wenn sie von der Drucktuchunter- zur Drucktuchoberseite zeigt. Schließlich wird die positive 2-Richtung stets derart festgelegt, dass aus allen positiven Richtungen ein Rechtssystem entsteht.

Weiterhin werden zwei auf der Drucktuchebene senkrecht stehende Ebenen unterschieden: die (13)- sowie (23)-Transversalebene. Die 1- und 2-Richtungen werden auch als Materialhauptrichtungen bezeichnet, da Zugbelastungen in diesen Richtungen keine Schubdeformation in Drucktuchebene hervorrufen. Aus den 1- und 2-Richtungen lassen sich die x- und y-Richtungen durch Drehung um einen Winkel  $\alpha$  um die 3-Achse ableiten. Zugbelastungen in x- und y-Richtungen sind allerdings mit Schubkopplung verbunden.

Außerdem gelten für die elastischen Materialkonstanten folgende Notationen. Die Notation der Querkontraktionszahl als  $\nu_{ij}$  bedeutet eine Kontraktion (oder Ausdehnung) in j-Richtung infolge einer Belastung in i-Richtung.  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  bezeichnen linearisierte E-Moduln (E-Moduln bei kleinen Verformungen) in 1-, 2- und 3-Richtung.  $\nu_{ij}$  und  $G_{ij}$  sind die Querdehnzahlen und Schubmoduln in der jeweiligen (ij)-Ebene.

Modelle zum mechanisch-drucktechnischen Drucktuchverhalten		
Homogenisierendes Modell	Quasi-3D-Modell	Mehrschichtenmodell
<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Unterscheidung der einzelnen Schichten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unterscheidung der einzelnen Schichten nach ihrer Funktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betrachtung der einzelnen Schichten als 3D-Kontinua</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Materialorientiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Funktionsorientiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufbauorientiert</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Orthotrop (Sonderform der Anisotropie. Keine Kopplung zwischen Dehnungs- und Schubverzerrungen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anisotrop</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anisotrop</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Linear viskoelastisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hyper- bzw. schaumelastisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materialmodelle noch zu bestimmen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifikation des Materialverhaltens aufwändig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifikation des Materialverhaltens nach „Standardversuch“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verfahren zur Identifikation des Materialverhaltens noch zu bestimmen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zweidimensional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dreidimensional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dreidimensional</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bereits behandelt (Michel [MIC99])</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Dient als Grundlage für das Mehrschichtenmodell</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kann wegen fehlender Versuchsmethodik und Materialmodelle noch nicht behandelt werden</li> </ul>
<p>Stark idealisierte Modellierung → verbesserte, realitätsnahe Modellierung</p>		

keine Unterscheidung zwischen einzelnen Drucktuchkomponenten durch und betrachtet das Drucktuch als Ganzes. Im Vordergrund der Betrachtung steht also nur das äußere Verhalten aller Drucktuchkomponenten zusammen. Dieses Modell ist sinnvoll, wenn der Einfluss äußerer Prozessparameter von Interesse ist, wie z. B. der Druckbeistellung, -geschwindigkeit oder auch der gesamten Drucktuchdicke. Einzelschichtbezogene (innere) Parameter können jedoch nicht studiert werden. Die Bezeichnung dieses Modells als materialorientiert beruht auf der Homogenisierung der mechanischen Eigenschaften einzelner Drucktuchkomponenten, unabhängig von der Art und Weise, wie sie beim Drucken zum Tragen kommen. Das Modell von Michel geht beim Drucktuch von Orthotropie aus, die jedoch nicht ganz zutrifft, da die Drucktuchmittelfläche keine Materialsymmetrieebene darstellt. Dadurch entsteht im Allgemeinen eine Kopplung von Scheiben- und Platteneffekt [BEC02]. Michel beschrieb viskose Effekte anhand der linearen Viskoelastizität. Er ging davon aus, dass das Drucktuch gleiche Eigenschaften und Belastungen über seine Breite aufweist, sodass zweidimensional gerechnet werden kann. Damit können z. B. Randeffekte an Drucktuch- bzw. Bogenkanten nicht erfasst werden.

Ein Modell, das das Drucktuch in seinen Einzelschichten aufteilt (Drucktuch als Laminat) ist in der rechten Tabellenspalte aufgeführt und soll ermöglichen, sowohl den Einfluss innerer als auch äußerer Parameter rechnerisch und umfassend zu beschreiben. Es lässt sich jedoch derzeit werkstofftechnisch nur schwer charakterisieren. Einerseits entstehen Elastomer und Laminat bei der Herstellung zum Teil gleichzeitig, sodass die Drucktuchschichten einer Materialcharakterisierung nicht einzeln zur Verfügung stehen und sich außerdem aus dem Drucktuch schwer trennen lassen. Hinzu kommen noch die geringen Schichtdicken sowie das Fehlen von Testeinrichtungen zur räumlichen Materialcharakterisierung und von Materialmodellen, die Verbindungen zwischen den einzelnen Drucktuchschichten herstellen. An diesen Problemstellungen wird derzeit am Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt gearbeitet.

In dieser Arbeit wird das in der mittleren Tabellenspalte aufgeführte Quasi-3D-Modell behandelt. Es soll eine Berechnungsgrundlagen zur Erreichung des Mehrschichtenmodells schaffen. Das Quasi-3D-Modell beruht auf der bereits erwähnten Trennung des Drucktuchs in druckende und tragende Bestandteile und kann daher als funktionsorientiert bezeichnet werden. Es versucht, die mechanisch-drucktechnischen Eigenschaf-

ten des Drucktuchs soweit räumlich zu simulieren, wie die in der Druckpraxis etablierten (Standard-) Tests zur Materialcharakterisierung es zulassen.

## 5.2 Vorgehensweise

Die Simulation des mechanisch-drucktechnischen Drucktuchverhaltens wird zweckmäßig in folgende Phasen eingeteilt, die zuerst kurz skizziert seien:

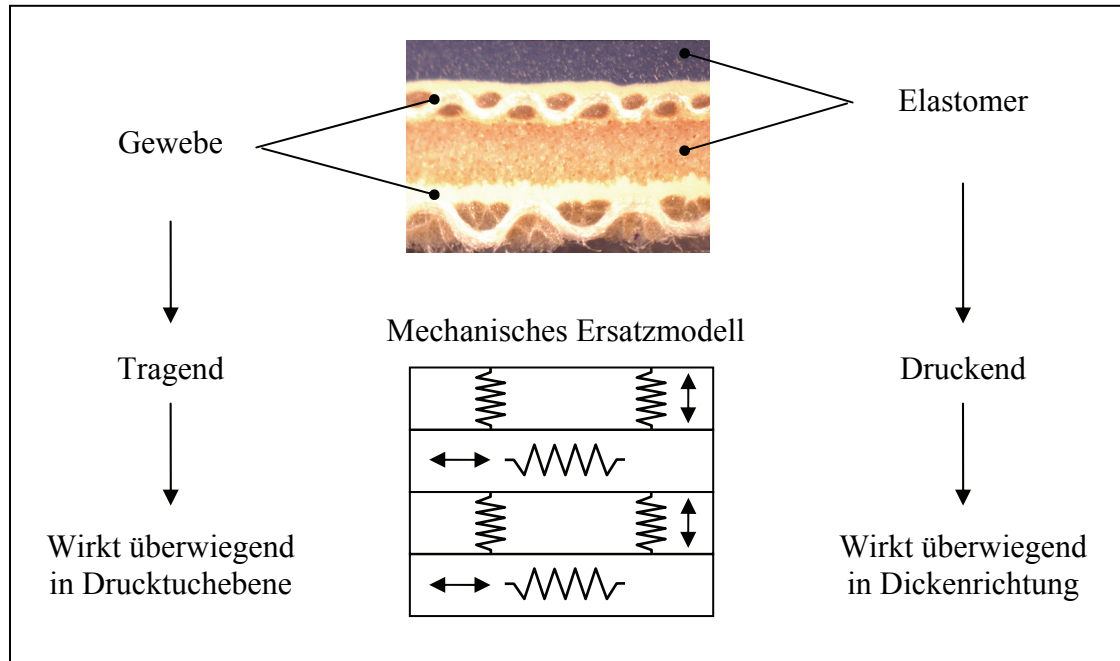
1. Modellbildung,
2. Identifikation der Materialparameter,
3. Umsetzung in ein Finite-Element-Modell,
4. Modellvergleich mit etablierten Modellen aus der Literatur sowie
5. Modelleinsatz zur Simulation der Abrollung von Drucktuch und Druckplatte.

Bei der Modellbildung werden die im Hinblick auf die Abrollsimulation relevanten Drucktucheigenschaften in ein mechanisches Modell abstrahiert werden. Wichtig ist die Zusammensetzung des Drucktuchs aus verschiedenen Schichten bzw. Materialien. Jedes beteiligte Material soll im nächsten Schritt anhand eines geeigneten Materialmodells beschrieben werden. Die entsprechenden Materialparameter sind experimentell zu identifizieren. Das erstellte Modell soll anschließend im Hinblick auf die Lösung des Abrollproblems mit der Methode der finiten Elemente in ein Finite-Element-Modell umgesetzt werden. Die Aussagekraft des FE-Modells wird durch Vergleich mit Rechenergebnissen aus der Literatur, insbesondere aus der Dissertation von Michel, festgestellt (Punkt 4). Abschließend wird das Finite-Element-Modell eingesetzt, um die Abrollung von Drucktuch und Druckplatte zu simulieren. Die Durchführung aller erforderlichen Rechnungen erfolgt mit dem FEM-Programm Abaqus, das vielfältige Rechenalgorithmen bei der numerischen Behandlung nichtlinearer struktureller Probleme bietet. In den folgenden Abschnitten werden die Phasen 1 bis 5 ausführlich behandelt.

## 5.3 Modellbildung

Das Drucktuch wird in die druckenden Elemente Deckschicht und Luftpolsterschicht und die tragenden Elemente Gewebeschichten aufgeteilt, Abbildung 5.1. Die für den Druckprozess wichtigen mechanischen Drucktucheigenschaften in Dickenrichtung werden nach dieser Aufteilung hauptsächlich von den elastomeren Schichten bestimmt und können als über die Drucktuchdicke aufgebrauchte Federn veranschaulicht werden.

Die Gewebeschichten sind für Aufbau und Aufrechterhaltung der Drucktuchspannung während des Druckprozesses verantwortlich, also für die mechanischen Eigenschaften in der Drucktuchebene. Sie werden durch die in der Drucktuchebene wirkenden (sehr steifen) Federn abgebildet.



**Abbildung 5.1:** Mechanisches Ersatzmodell eines Luftpolsterdrucktuchs.

#### 5.4 Identifikation der Materialparameter

Die Identifikation der mit den einzelnen Drucktuchschichten einhergehenden Materialien und die Ermittlung zugehöriger Materialparameter sollen an Labormaßstab auf Basis elementarer, in der Druckpraxis etablierter Tests erfolgen: des Zug- und Stempelversuchs. Es sind also folgende Materialien zu charakterisieren:

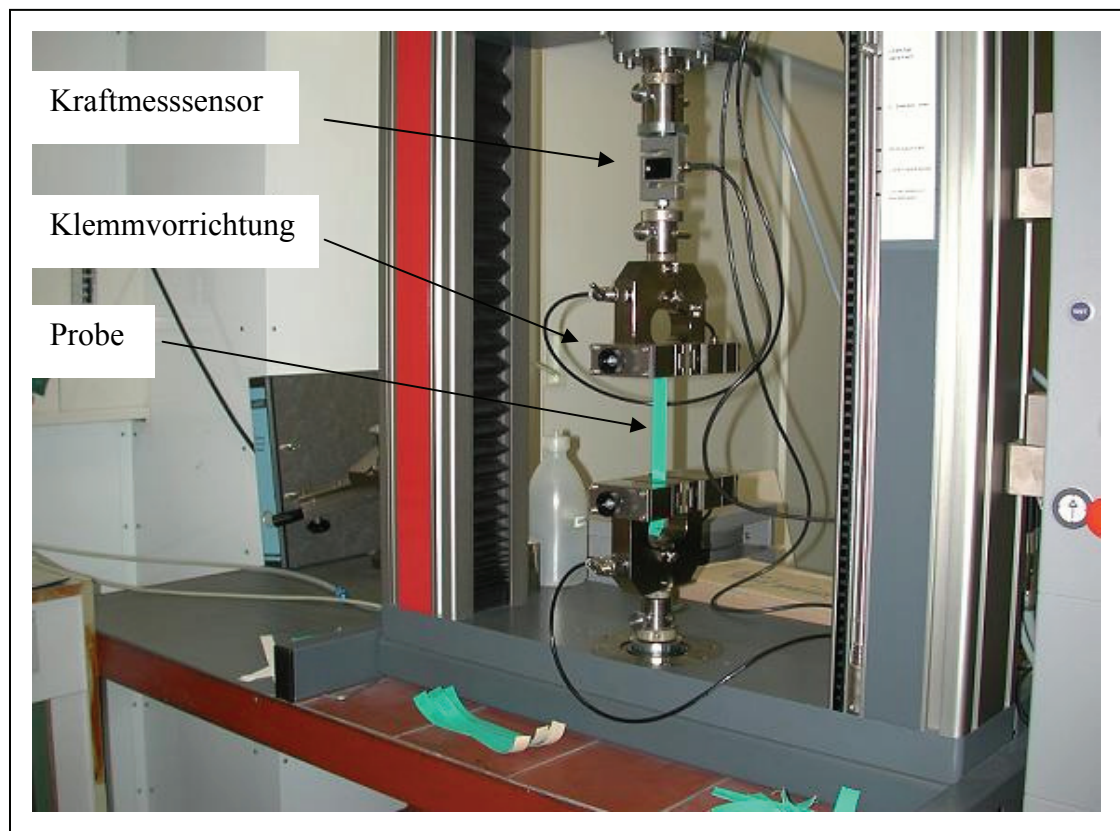
- die elastomere Deckschicht (Vollgummi),
- die elastomere Luftpolsterschicht mit überdruckgesteuerten Zellen bzw. eingebetteten Hohlkugeln (entfällt beim konventionellen Drucktuch Opal) sowie
- die Stabilisierungs- und Festigkeitsschichten, jeweils mit Kett- und Schussfäden aus Baumwolle.

Die Eigenschaften des Drucktuchs in seiner Ebene werden durch den Zugversuch charakterisiert, wobei zwei Materialrichtungen von großer Relevanz sind: die Kett- und die Schussrichtung. Die Drucktucheigenschaften in Dickenrichtung werden durch den Stempelversuch ermittelt.



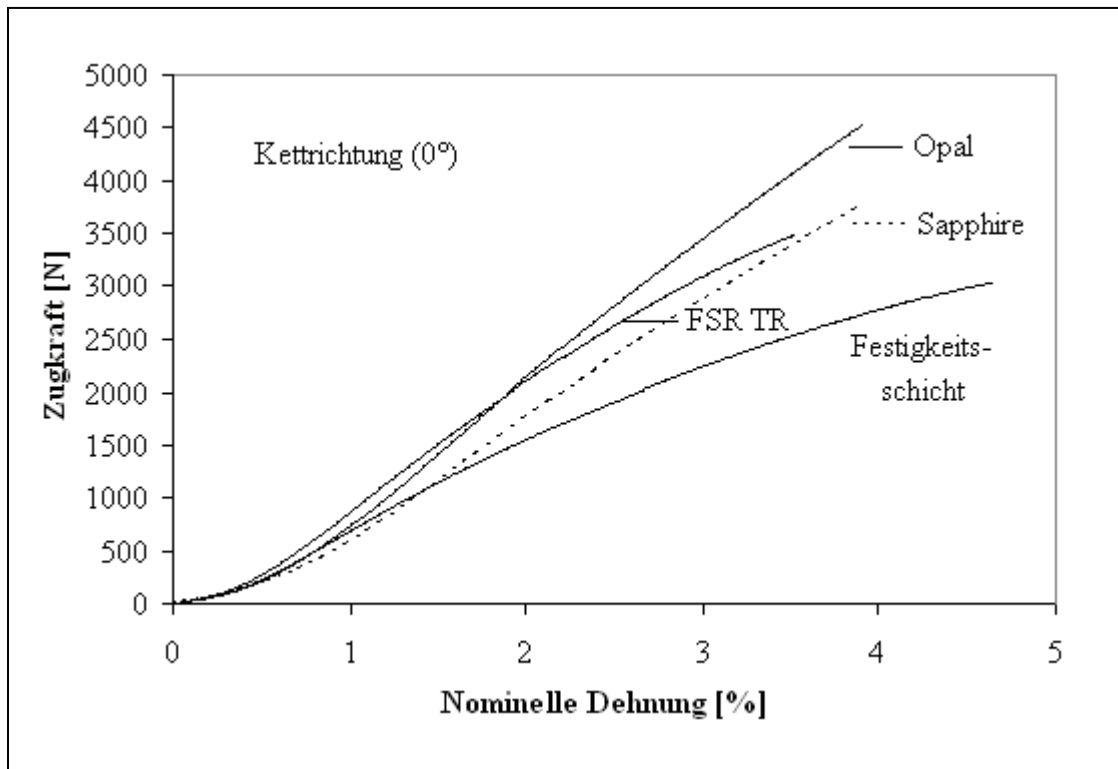
### 5.4.1 Kraft-Verformungsverhalten der Drucktuchebeine

Der Zugversuch wurde nach DIN 53354 an einer Zwick/Roell-Zugmaschine durchgeführt, Abbildung 5.2. Dabei wurden für die Drucktücher FSR TR, Sapphire und Opal streifenförmige Proben mit den Abmessungen 500 mm x 50 mm unter 0°, 90°- und 45°-Winkel (in Bezug auf die Kettrichtung) vorbereitet und quasistatisch durch eine Zugkraft bis zum Bruch belastet. Die Proben wurden vor dem Versuch 24 Stunden bei einer Temperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % klimatisiert. Die gleichen Zugprüfungen wurden außerdem für eine reine Festigkeitsschicht durchgeführt, die aus einem ConiTech-Produkt stammt.



**Abbildung 5.2:** Ermittlung des quasistatischen Kraft-Verformungs-Verhaltens der Drucktuchebeine an einer Zwick/Roell-Zugmaschine.

Für jedes Drucktuch wurden je Winkel 3 Proben geprüft und die quasistatischen Kraft-Dehnungs-Kurven gemittelt. Die einzelnen Kurven zeigten voneinander keine signifikanten Abweichungen. Abbildung 5.3 zeigt die mittleren Kraft-Dehnungs-Kurven bei Belastung in 0°-Richtung. Als Dehnung ist dabei die nominelle Dehnung aufgetragen, also das Verhältnis aus Probenverlängerung und freier Ausgangsprobenlänge (= Länge der zwischen den Klemmvorrichtungen der Zugmaschine freiliegenden, unverformten Probe.)



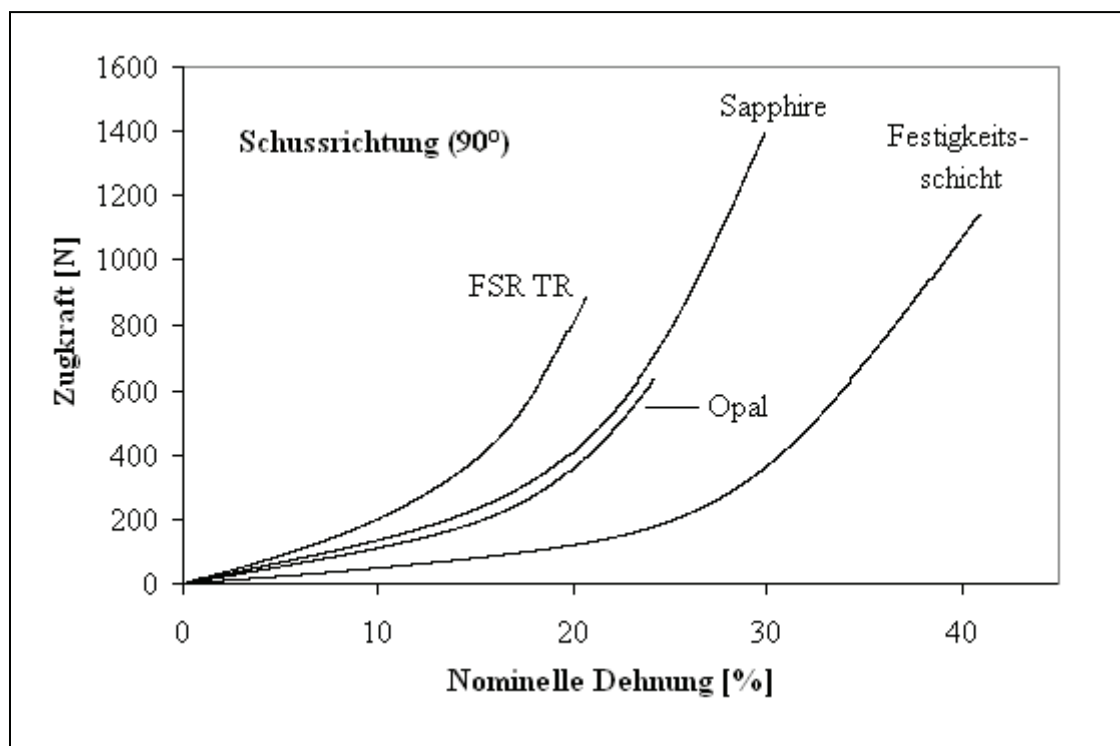
**Abbildung 5.3:** Kraft-Dehnungs-Diagramm in Kettrichtung ( $0^\circ$ ). Probenabmessungen: 500 mm x 50 mm x 1,97 mm. Probenvortemperierung: 24 h bei einer Temperatur von  $23^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchte von 50 %.

Bis etwa 0,5 % Dehnung weisen in Kettrichtung sowohl alle Drucktücher als auch die Festigkeitsschicht mit zunehmender Dehnung einen langsamen Anstieg der Kraft auf, der als Gewebeeigenschaft betrachtet und auf die Ausrichtung der einzelnen Gewebefäden zurückgeführt werden kann. Nach diesem Anlaufbereich weisen die Drucktücher Sapphire und Opal einen näherungsweise linearen Kraft-Dehnungs-Zusammenhang auf. Beim Drucktuch FSR TR und der reinen Festigkeitsschicht nimmt die Steigung der Kurve ab etwa 2 % Dehnung bis zum Bruch leicht ab. Die Bruchdehnung liegt bei allen Proben unter 5 %.

In Schussrichtung sind die Drucktücher über 20 % dehnbar, Abbildung 5.4. Alle Proben zeigen eine anfangs lineare Kraft-Dehnungs-Abhängigkeit auf. Bei hohen Dehnungen nimmt die Steifigkeit der Proben bis zum Bruch zu.

Sowohl in Kett- als auch in Schussrichtung kann es an den Kraft-Dehnungs-Diagrammen nicht abgelesen werden, inwieweit die elastomeren Schichten zur gemessenen Kraft beitragen. Da andererseits diese Diagramme sowohl für die (ganzen) Drucktüchern als auch die reine Festigkeitsschicht sehr ähnliche Verläufe zeigen, wird im Folgenden angenommen, dass das Kraft-Verformungs-Verhalten der Drucktuchebene

hauptsächlich von den Kett- bzw. Schussfäden, nicht jedoch von den elastomeren Bestandteilen bestimmt ist. D.h., die im Zugversuch am gesamten Drucktuch gemessene Kraft-Dehnungs-Kurve würde das elastische Verhalten der reinen Gewebeschichten beschreiben. In Kettrichtung ist diese Annahme aufgrund der hohen Kräfte, die die Drucktuchebeine schon bei geringen Dehnungen abträgt, elastomere Werkstoffe jedoch wegen ihrer niedrigen E-Moduln nicht aufbringen können, gerechtfertigt. In Schussrichtung dagegen stellt die am gesamten Drucktuch gemessene Kraft-Dehnungs-Kurve aufgrund der geringeren Zugkräfte und des im Allgemeinen nicht mehr zu vernachlässigenden Beitrags der elastomeren Schichten nur eine grobe Näherung des Kraft-Verformungs-Verhaltens des reinen Gewebes dar.



**Abbildung 5.4:** Kraft-Dehnungs-Diagramm in Schussrichtung (90°). Probenabmessungen: 500 mm x 50 mm x 1,97 mm.

#### 5.4.2 Dehnung im Montagezustand

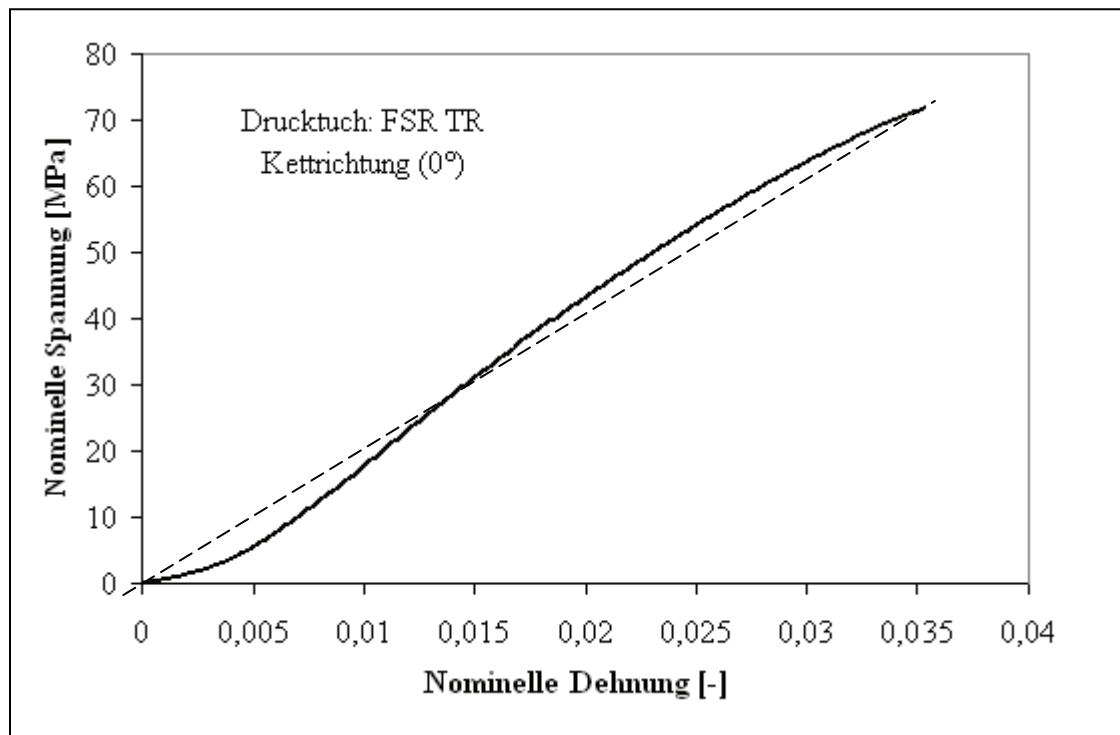
Um denjenigen Bereich der Kraft-Dehnungs-Kurve zu ermitteln, der für die Abrollsimulation von Interesse ist, muss die Dehnung des Drucktuchs im Montagezustand abgeschätzt werden. Dazu wurden die Drucktücher FSR TR, Sapphire und Opal um den Gummizylinder der Versuchsmaschine MOZ-P mit dem gleichen Spannmoment (50 Nm) gespannt. Papierstreifen mit definierter Länge wurden anschließend in und quer zur Druckrichtung auf die Drucktuchoberfläche fixiert, und ihre Länge wurde auf

die Drucktuchoberfläche markiert. Danach wurden die Drucktücher demontiert und der Abstand zwischen den Markierungen im entspannten Zustand gemessen. Für die Drucktücher ergab sich eine Oberflächendehnung bzw. -querkontraktion in bzw. quer zur Druckrichtung von etwa 1,5 % bis 2 %. Es wird angenommen, dass beim Drucken die Dehnung der Drucktuchebene geringfügig um diese Werte pendelt.

### 5.4.3 E-Modul in Drucktuchebene

Von den Kraft-Dehnungs-Kurven in Kett- und Schussrichtung ist deshalb nur der Anfangsbereich, bis etwa 3 % Dehnung, relevant, in dem für die weitere Betrachtung ein linear-elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt werden kann. Bei den kompressiblen Drucktüchern wird angenommen, dass Stabilisierungs- und Festigkeitsgewebe aus gleichem Material hergestellt sind.

Die im Zugversuch ermittelten Kraft-Dehnungs-Kurven werden durch Beziehen der Kraft auf den Ausgangsquerschnitt der Gewebeschichten in Spannungs-Dehnungs-Kurven skaliert und durch Ausgleichen linearisiert, Abbildung 5.5, woraus die quasi-statischen E-Moduln (= E-Moduln bei sehr niedriger Belastungsgeschwindigkeit) folgen, Tabelle 5.2.



**Abbildung 5.5:** Ermittlung des quasistatischen E-Moduls durch Linearisierung am Beispiel des Drucktuchs FSR TR und der Kettrichtung (0°). Die gestrichelte Linie ist der im Dehnungsbereich [0 %... 3 %] linearisierte Spannungs-Dehnungs-Verlauf, aus deren Steigung sich der E-Modul ergibt.

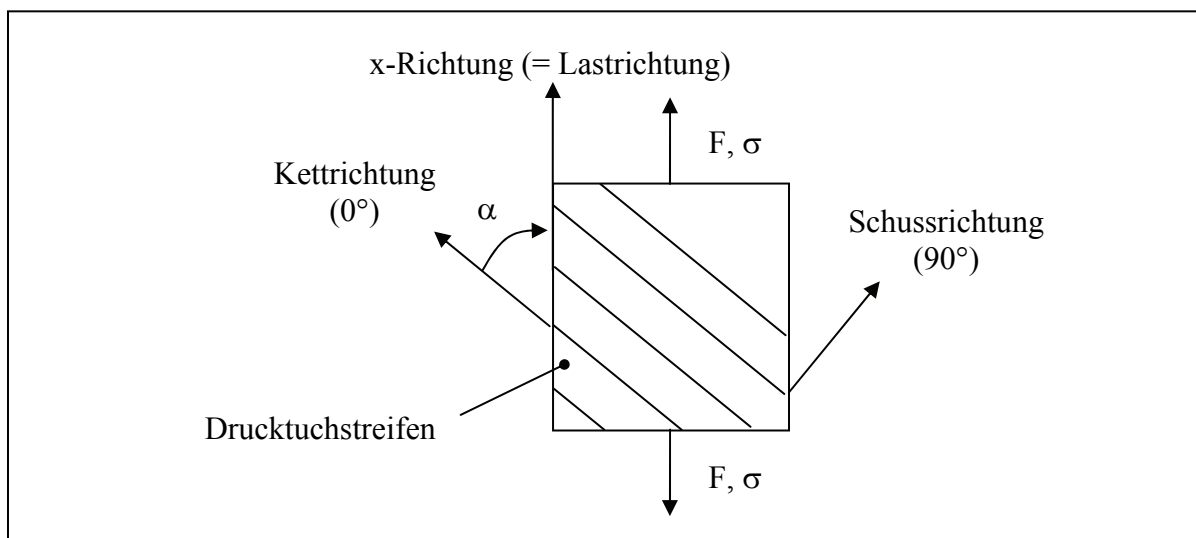
Bei den Drucktüchern FSR TR bzw. Opal liegt der E-Modul in Kettrichtung im Verhältnis von etwa 50 bzw. 100 zum E-Modul in Schussrichtung, was darauf hindeutet, dass die Gewebeschichten das Drucktuch hauptsächlich eindimensional (in Druckrichtung) verstärken.

	FSR TR (ContiTech)	Sapphire (Phoenix)	Opal (Phoenix, konventionell)
Kettrichtung	2240	1500	1990
45°-Richtung	45	15	18
Schussrichtung	38	20	17

**Tabelle 5.2:** Linearisierte, quasistatische E-Moduln in MPa. Die Werte wurden aus dem Zugversuch auf Basis des Dehnungsbereichs [0 %... 3 %] ermittelt.

#### 5.4.4 Schubmodul in Drucktuchebene

In Drucktuchebene lässt sich der Schubmodul aus den E-Moduln abschätzen.  $E_{\text{Kett}}$ ,  $E_{\text{Schuss}}$ ,  $G$  und  $\nu$  bezeichnen im Folgenden die E-Moduln des Drucktuchs in Kett- und Schussrichtung, den Schubmodul in Drucktuchebene und die Querdehnzahl, die die Dehnung in Schussrichtung bei Belastung in Kettrichtung angibt. Betrachtet wird zunächst ein Drucktuchstreifen, der in einer von der Kettrichtung abweichenden Richtung  $x$  durch eine Zugkraft  $F$  belastet wird, Abbildung 5.6.



**Abbildung 5.6:** Drucktuchstreifen bei Zugbelastung in von der Kettrichtung abweichenden Richtung  $x$  (Lastrichtung).  $F$ ,  $\sigma$ : Zugkraft bzw. -spannung.  $\alpha$ : Winkel, um den die Lastrichtung von der Kettrichtung abweicht.

Die Lastrichtung  $x$  weicht von der Kettrichtung um den Winkel  $\alpha$ . Wird die Zugkraft auf den Querschnitt des Drucktuchstreifens bezogen, so ergibt sich die Zugspannung  $\sigma$ . In  $y$ -Richtung (senkrecht zur Lastrichtung) ist die Spannung null. Außerdem bleibt der Streifen schubspannungsfrei. Die Normaldehnungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung und die Scherung der  $xy$ -Ebene ergeben sich aus der Transformation [BEC02]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T_\varepsilon] \cdot [S] \cdot [T_\varepsilon]^T \cdot \begin{bmatrix} \sigma \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

mit der Transformationsmatrix

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -\frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

die die Abweichung von Last- und Kettrichtung berücksichtigt, und der Nachgiebigkeitsmatrix des Drucktuchs in Bezug auf die Kett- und Schussrichtungen

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{Kett}} & -\frac{\nu}{E_{Kett}} & 0 \\ -\frac{\nu}{E_{Kett}} & \frac{1}{E_{Schuss}} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Insbesondere für die Dehnung in Lastrichtung gilt

$$\varepsilon_x(\alpha) = \left[ \cos^4 \alpha + \frac{E_{Kett}}{E_{Schuss}} \sin^4 \alpha + \frac{1}{2} \left( -\nu + \frac{1}{2} \frac{E_{Kett}}{G} \right) \sin^2(2\alpha) \right] \left( \frac{\sigma}{E_{Kett}} \right) \quad (5.4)$$

oder

$$\varepsilon_x(\alpha) = \left[ \cos^4 \alpha + e \sin^4 \alpha + \frac{1}{2} K \sin^2(2\alpha) \right] \left( \frac{\sigma}{E_{Kett}} \right), \quad (5.5)$$

mit dem Verhältnis aus den E-Moduln in Kett- und Schussrichtung

$$e = \frac{E_{Kett}}{E_{Schuss}} \quad (> 1) \quad (\text{Orthotropiefaktor}), \quad (5.6)$$

dem Verhältnis aus E-Modul in Kettrichtung und Schubmodul

$$g = \frac{E_{Kett}}{G} \quad (\text{Schubfaktor}) \quad (5.7)$$

und eine aus der Querdehnzahl und dem Schubfaktor abgeleitete (winkelunabhängige) Konstante

$$K = -\nu + \frac{1}{2} g . \quad (5.8)$$

Gl. 5.8 lässt sich mit Gl. 5.7 auch als

$$G = \frac{E_{Kett}}{2(K + \nu)} \quad (5.9)$$

schreiben. Daraus resultiert für den Fall  $K = 1$ , der u. a. bei Isotropie auftritt,

$$G = \frac{E_{Kett}}{2(1 + \nu)} . \quad (5.10)$$

Der E-Modul  $E_\alpha$  unter einem bestimmten Winkel  $\alpha$  ergibt sich aus Gl. 5.5 zu

$$E_\alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon_x(\alpha)} = \left( \frac{E_{Kett}}{\cos^4 \alpha + e \sin^4 \alpha + \frac{1}{2} K \sin^2(2\alpha)} \right) . \quad (5.11)$$

Beim Drucktuch ist die Schussrichtung nicht immer die schwächste Materialrichtung, da der Ausdruck auf der rechten Seite von Gl. 5.11 nicht immer bei  $90^\circ$  ein absolutes Minimum annimmt sondern im Allgemeinen beim Winkel  $\alpha$  mit

$$\tan^2 \alpha = \frac{1 - K}{e - K} \quad (5.12)$$

der erst für einen Wertebereich

$$K < 1 \quad \text{oder} \quad K > e \quad (5.13a, b)$$

existiert. Ist nun der E-Modul  $E_\alpha$  in einer Richtung  $x$  bekannt, z. B. aus einer Messung bei einachsigen Zug unter dem Winkel  $\alpha$ , so ergibt sich der Wert von  $K$  aus der Gl. 5.11 insbesondere für den Winkel  $\alpha = 45^\circ$  zu

$$K = 2 \frac{E_{Kett}}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{2} (1 + e) . \quad (5.14)$$

D. h., würden einachsige Zugversuche in Kett- und Schussrichtung sowie unter dem Winkel  $45^\circ$  durchgeführt und dabei die entsprechenden E-Moduln ermittelt, so resultiere über Gl. 5.14 die Konstante  $K$ , die entsprechend Gl. 5.8 sowohl einen Querdehn-

als auch einen Schubanteil additiv verknüpft. Die Summe nach Gl. 5.8 lässt sich nach der Querdehnzahl bzw. Schubfaktor selbst durch einachsige Zugversuche unter weiteren Winkeln nicht eindeutig lösen. Eine Abschätzung des Schubmoduls kann jedoch aus Gl. 5.8 folgen, wenn die Querdehnzahl gegen den Schubfaktor vernachlässigt wird. Dann gilt

$$G \approx \frac{E_{0^\circ}}{2K} \equiv \bar{G} \quad (5.15)$$

Der Schätzfehler beträgt

$$\Delta G = |\bar{G} - G| = \frac{1}{2} E_{0^\circ} \left| \frac{\nu}{K(K + \nu)} \right| \quad (5.16)$$

oder

$$\frac{\Delta G}{\bar{G}} = \left| \frac{\nu}{K + \nu} \right| 100 \%, \quad (5.17)$$

mit einer Singularität bei

$$\nu = -K. \quad (5.18)$$

Für reale, endlich schubsteife Drucktücher ( $g \neq 0$ ) trifft jedoch Gl. 5.18 mit Gl. 5.8 nicht zu. Die Positivdefinitheit der Nachgiebigkeitsmatrix  $[S]$  nach Gl. 5.3 impliziert außerdem

$$\det(S) \geq 0. \quad (5.19)$$

Daraus folgt für die Querdehnzahl die Forderung

$$-\sqrt{e} \leq \nu \leq \sqrt{e} \quad (5.20)$$

sodass der relative Fehler nach Gl. 5.17 höchstens

$$\left. \frac{\Delta G}{\bar{G}} \right|_{\max} = \sup \left\{ \left| \frac{\sqrt{e}}{K - \sqrt{e}} \right|, \left| \frac{\sqrt{e}}{K + \sqrt{e}} \right| \right\} 100 \% \quad (5.21)$$

beträgt. Gl. 5.15 liefert eine gute Abschätzung des Schubmoduls, wenn die Querdehnzahl nahezu null ist, oder falls

$$K \rightarrow \infty \quad (5.22)$$

also nach Gl. 5.8 für

$$g \rightarrow \infty \text{ bzw. } G \rightarrow 0 \quad (5.23)$$



etwa für sehr schubweiche Drucktücher. Die größten Unsicherheiten bei der Abschätzung nach Gl. 5.15 entstehen andererseits für Drucktücher mit

$$K \rightarrow \sqrt{e}. \quad (5.24)$$

Für die untersuchten Drucktücher ergeben sich für den Schubmodul die in Tabelle 5.3 angegebenen Schätzwerte. Die E-Moduln entsprechen dabei den Werten aus Tabelle 5.2. Orthotropiefaktor, Konstante K, Schubmodul und Schätzfehler wurden nach Gln. 5.6, 5.14, 5.15 und 5.17 bestimmt. Da der Schub im Druckprozess nicht die dominierende Belastungsart darstellt, können die ermittelten Schubmoduln mit den Schätzfehlern von 6 % bis 12 % als gute Richtwerte betrachtet werden.

	FSR TR	Sapphire	Opal
$E_{\text{Kett}}$ [MPa]	2240	1500	1990
$E_{\text{Schuss}}$ [MPa]	38	20	17
$E_{45^\circ}$ [MPa]	45	15	18
Orthotropiefaktor e	59	75	117
Konstante K	69,58	162	162
Schubmodul G [MPa]	16	4,6	6,1
Schätzfehler	12 %	6 %	7 %

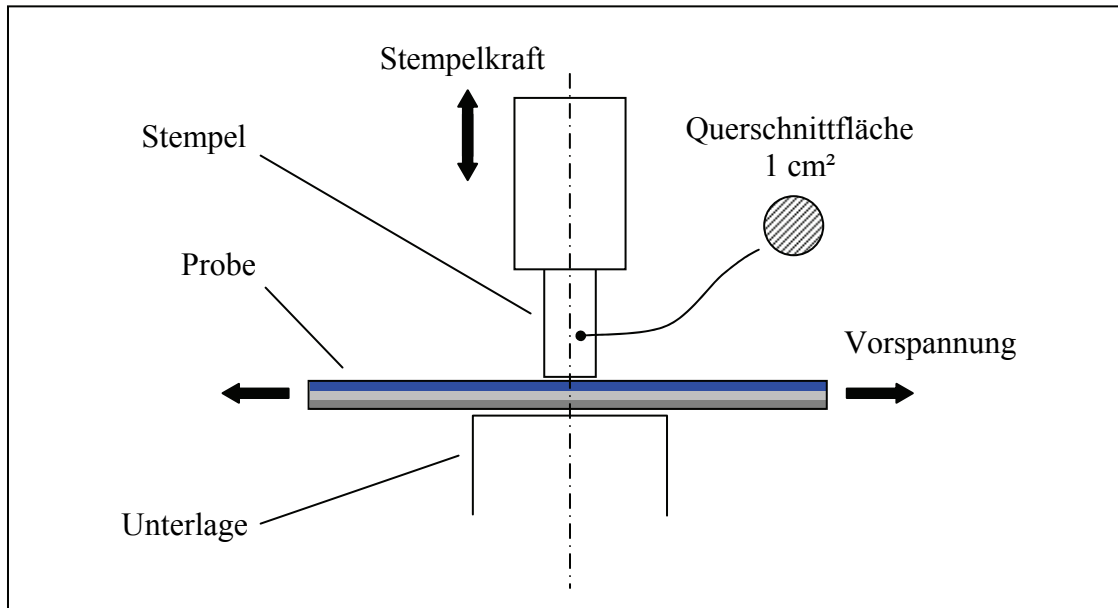
**Tabelle 5.3:** Schätzwerte für den quasistatischen, linearisierten Schubmodul in Drucktuchebeine.

Mit den Werten in Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 liegen somit für die Gewebeschichten die Elastizitätsmoduln in Kett- und Schussrichtung sowie Schätzwerte für den Schubmodul vor.

#### 5.4.5 Elastizität in Dickenrichtung

Die experimentelle Untersuchung zur Zusammendrückbarkeit der Drucktücher erfolgte an einer Stempelversuchseinrichtung der Firma ContiTech, Abbildung 5.7. Die Versuchseinrichtung besteht aus einer Spannvorrichtung, die eine rechteckige Drucktuchprobe in ihrer Ebene bei 400 N/cm vorspannt bzw. um etwa 2 % in Druckrichtung dehnt. Ein runder, flacher Stempel (Querschnittsfläche: 1 cm<sup>2</sup>) belastet die Drucktuch-

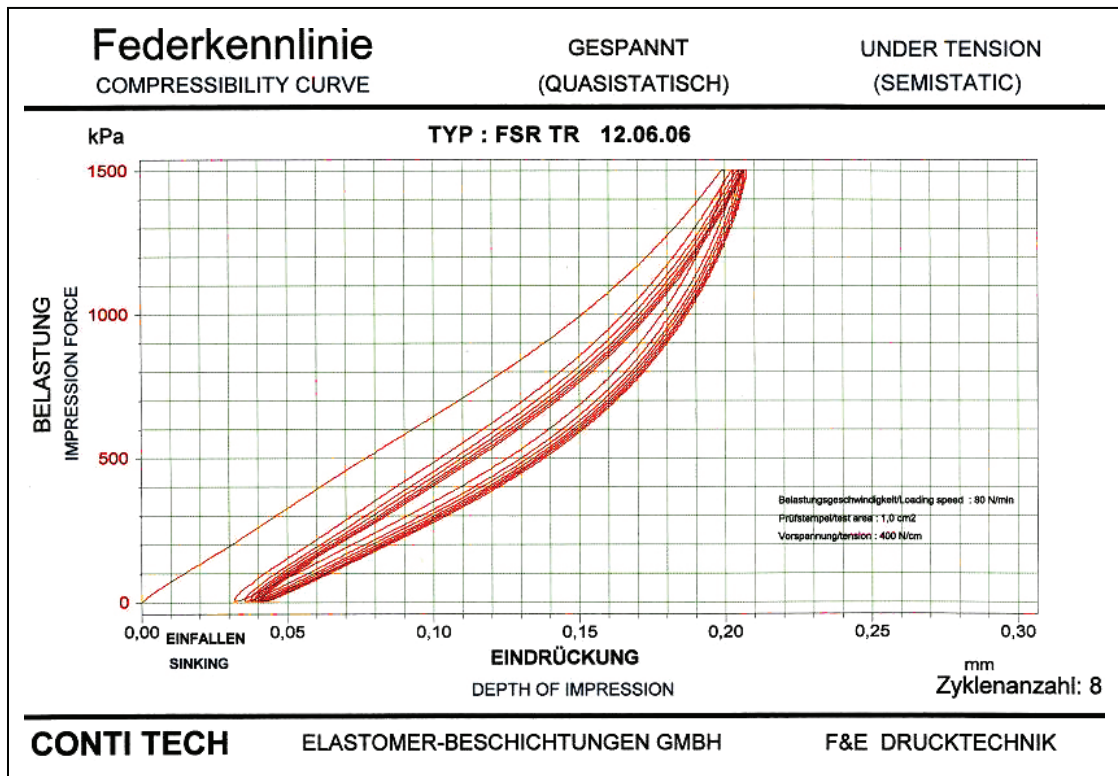
oberfläche zyklisch. Die Vorspannung auf einen Dehnungswert von 2 % entspricht der Vorspannung des Drucktuchs im Montagezustand auf den Gummizylinder.



**Abbildung 5.7:** Versuchsanordnung zur Ermittlung der Federkennlinie. Probenabmessung: 92 mm x 25 mm x 1,97 mm. Freie Probenlänge: 6 mm. Vorspannung: 400 N/cm. Maximale Belastung: 150 N bzw. 1,5 MPa. Belastungsgeschwindigkeit: 80 N/min. Anzahl der Belastungszyklen: 8.

Die Stempelkraft wird in acht Zyklen jeweils quasistatisch auf einen Maximalwert linear gesteigert und wieder linear abgebaut. Ein Wegsensor registriert dabei die Stempелеindrückung, woraus die quasistatische Federkennlinie resultiert, Abbildung 5.8.

Für jeden Belastungszyklus zeichnet sich eine Hysterese ab, die sich mit fortschreitender Zykluszahl immer mehr nach rechts verschiebt. Nach dem ersten Belastungszyklus bildet sich ein relativ großer Anteil der Eindrückung bei Entlastung nicht wieder zurück. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch Erstbelastung eingeschlossene Luft aus den Gewebeschichten heraus gepresst wird. Die irreversiblen Verformungsanteile fallen jedoch bei weiteren Zyklen geringer aus und sind dafür verantwortlich, dass durch fortschreitende Belastung die Spannung, die sich bei der einen und selben Eindrückung baut, von dem einen Belastungszyklus zum nächsten immer geringer wird. Die Spannungsabnahme erlischt jedoch bereits nach einigen Zyklen. Die dadurch stagnierende (stabile) Hysterese, die für die folgenden Ausführungen von Interesse ist, beschreibt dann eine reversible Verformung, bei der Be- und Entlastungsäste unterschiedlich sind. Dies kann auf Reibung innerhalb der elastomeren Schichten (Coulomb'sche Reibung) zurückgeführt werden.

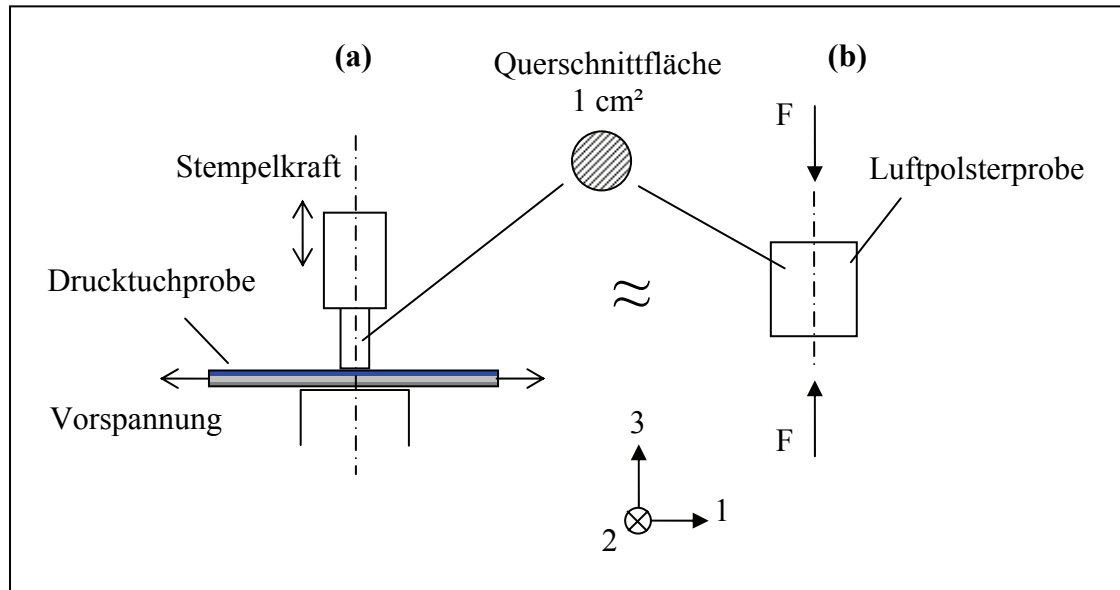


**Abbildung 5.8:** Quasistatische Federkennlinie des Drucktuchs FSR TR, generiert an der Stempelversuchseinrichtung der Firma ContiTech.

Nun soll zur Beschreibung der Federkennlinie ein Materialmodell bestimmt werden. Dazu wird entsprechend der Aufteilung des Drucktuchs in druckende und tragende Schichten angenommen (vgl. Abschnitt 5.3), dass die elastomeren Schichten im Vergleich zu den Gewebeschichten den größten Anteil der Eindrückung nach sich ziehen (siehe Abbildung 3.1). Werden außerdem die Deckschicht als vollkommen inkompressibel ( $\nu = 0,5$ ) und die Luftpolsterschicht bei den kompressiblen Drucktüchern als vollkommen kompressibel ( $\nu = 0$ ) betrachtet, so würde sich die Deckschicht aufgrund ihrer Inkompressibilität im Vergleich zur Luftpolsterschicht wesentlich weniger zusammendrücken, sodass im Folgenden die Zusammendrückbarkeit des gesamten Drucktuchs und die der Luftpolsterschicht gleich gesetzt werden.

Nach diesen Annahmen ist die für das gesamte Drucktuch am Stempelversuch ermittelte Federkennlinie nichts anderes als die der reinen Luftpolsterschicht. Dadurch lässt sich die Drucktuchverformung durch Stempelbelastung anhand eines einfacheren Ersatzmodells abbilden, bei dem eine Luftpolsterprobe einer rein einachsigen Druckbelastung ausgesetzt wird, Abbildung 5.9. Für das Ersatzmodell gelte der Konsistenz halber das Gleiche, im Abschnitt 4.5 definierte Koordinatensystem. D. h., die einach-

sige Druckbelastung erfolgt in 3-Richtung. Die 1- und 2-Richtungen, die die Drucktuchebene spannen, sind für das Ersatzmodell weniger relevant.



**Abbildung 5.9:** Ersatzmodell für den Stempelversuch. (a) Stempelversuch mit dem ganzen Drucktuchaufbau, Vorspannung und Stempelkraft. (b) Einachsiger Versuch mit Druckbelastung  $F$ . Die Dicke der Luftpolsterprobe entspricht der der im Drucktuch liegenden Luftpolsterschicht, ihre Querschnittsfläche der des Stempels.

Die Dicke der Luftpolsterschicht wird im Folgenden als effektive Drucktuchdicke bezeichnet. Durch Vernachlässigung der Verformung der Gewebeschichten wird andererseits die Steifigkeit der Luftpolsterschicht unterschätzt. Für ein inkompressibles Drucktuch wird wegen nichtvorhandener Luftpolsterschicht die vollkommen inkompressible Deckschicht als in Dickenrichtung einziges verformbares Medium betrachtet. In diesem Fall entspricht die effektive Drucktuchdicke der Dicke der Deckschicht. Im Ersatzmodell nach Abbildung 5.9 ist dann statt der Luftpolsterprobe eine Probe aus Vollgummi einzusetzen. Tabelle 5.4 gibt für die untersuchten Drucktücher die effektiven Dicken und die darauf bezogene, prozentuale Eindrückung bei einer in der Druckpraxis üblichen Eindrückung von absolut 0,15 mm an. Aufgrund der großen relativen Eindrückungen wird für die Luftpolsterschicht der kompressiblen Drucktücher FSR TR und Sapphire ein schaumelastisches, für das Drucktuch Opal dagegen aufgrund dessen Inkompressibilität ein hyperelastisches Materialverhalten zugrunde gelegt.

Die Drucktücher Sapphire und Opal zeigten im Vergleich zum Drucktuch FSR TR eine steilere Federkennlinie auf. Beim Drucktuch Sapphire kann die höhere Steifigkeit

auf die geringere effektive Dicke, bei Opal dagegen auf die Inkompressibilität der Deckschicht zurückgeführt werden.

	FSR TR	Sapphire	Opal (konventionell)
Nenndicke [mm]	1,97	1,97	1,97
Effektive Dicke [mm]	0,6	0,25	0,7
Absolute Eindrückung [mm]	0,15	0,15	0,15
Relative Eindrückung [%]	25	60	20

**Tabelle 5.4:** Relative Eindrückungen bei einer absoluten Eindrückung von 0,15 mm.

#### 5.4.6 Materialmodell für die Drucktuchdicke bei den kompressiblen Drucktüchern

Um das quasistatische Spannungs-Dehnungs-Verhalten einer Luftpolsterschicht zu ermitteln, wird das Ersatzmodell entsprechend Abbildung 5.9b zugrunde gelegt und die Kraft-Eindrückungs-Kurve in eine Spannungs-Dehnungs-Kurve umgerechnet, als resultiere die Federkennlinie aus rein einachsiger Druckbelastung. Dazu wird bei der Federkennlinie aus dem letzten Belastungszyklus eine mittlere Kurve aus Be- und Entlastungsast gebildet. Durch Beziehen der Kraft auf den Stempelquerschnitt (1 cm<sup>2</sup>) und die Eindrückung auf die jeweilige effektive Drucktuchdicke resultiert für die Luftpolsterschicht die Abhängigkeit der nominellen (technischen) Spannung von der nominellen Dehnung.

Nun soll für die schaumelastische Luftpolsterschicht eine Verzerrungsenergiefunktion bestimmt werden, mit der sich die nach dem Ersatzmodell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Kurve gut wiedergeben lässt. Die Verzerrungsenergiefunktion lässt sich nach Storåkers [STO86] in der Form

$$U = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right] \quad (5.25)$$

ausdrücken, wobei  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) die Streckungen (= Verhältnis der verformten zur unverformten Länge bezüglich der jeweiligen Raumrichtung  $i$ ),  $J$  die Jacobi-Determinante (Volumenänderung zwischen Momentan- und Anfangskonfiguration),  $N$

den Grad der Verzerrungsenergiefunktion und  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  und  $\mu_i$  aus elementaren Tests experimentell zu gewinnende Materialparameter bezeichnen [STO86]. Der Parameter  $\beta_i$  ergibt sich aus der durchaus dehnungsabhängigen Querdehnzahl über

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1 - 2\nu_i} \quad (5.26)$$

Bei einachsiger Zusammendrückung folgen die Streckungen

$$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (1, 1, \lambda) = (1, 1, 1 + \varepsilon), \quad (5.27)$$

wobei  $\lambda$  bzw.  $\varepsilon$  die Streckung bzw. nominelle Dehnung in Lastrichtung „3“ bezeichnen (bei  $\lambda_3$  wird der Einfachheit halber auf eine Indizierung verzichtet), sowie die Jacobi-Determinante

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \lambda \quad (J \neq 1 \text{ wegen Kompressibilität.}) \quad (5.28)$$

Dadurch vereinfacht sich die Verzerrungsenergiefunktion nach Gl. 5.25 zu

$$U = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \lambda^{\alpha_i} - 1 + \frac{1}{\beta_i} (\lambda^{-\alpha_i \beta_i} - 1) \right]. \quad (5.29)$$

Die nominelle Spannung  $T$  in Lastrichtung ergibt sich aus

$$T = \frac{\partial}{\partial \lambda} U \quad (5.30)$$

zu

$$T = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda^{\alpha_i-1} - \lambda^{-\alpha_i \beta_i-1}). \quad (5.31)$$

Bei verschwindender Querdehnzahl gilt dann nach Gl. 5.26

$$\beta_i = 0, \quad (5.32)$$

wodurch sich wiederum Gl. 5.31 zu

$$T = \frac{2}{\lambda} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda^{\alpha_i} - 1) \quad (5.33)$$

vereinfacht. Die Spannung  $T$  hängt in nichtlinearer Weise mit den Parametern  $\alpha_i$  und  $\mu_i$  zusammen. Diese lassen sich daher aus den experimentell ermittelten Wertepaaren aus nomineller Spannung und nomineller Dehnung iterativ über ein nichtlineares Ausgleichsverfahren errechnen (z. B. in Abaqus [ABQ06], [TWI86]).

Da der Stempelversuch bis zu einer maximalen Stempelkraft von 150 N gefahren wird, wird nur ein kleinerer Dehnungsbereich abgedeckt, als für die Abrollung notwendig sein könnte. Deshalb ist es zweckmäßig, vor der Bestimmung der Verzerrungsenergiefunktion die aus dem Stempelversuch abgeleitete Spannungs-Dehnungs-Kurve mit einem Polynom  $\Pi(\epsilon)$  auszugleichen (z. B. in Matlab) und in Richtung höherer Dehnungen hin zu extrapolieren. Um die Extrapolationsfehler zu umgehen, sollte im Experiment die maximale Stempelkraft höher gesetzt werden. Es wird angenommen, dass während der Abrollung von Drucktuch und Druckplatte bzw. Bogen die Dehnungen in den elastomeren Schichten überwiegend Zusammendrückungen sind, insbesondere gilt für die Dehnung in Dickenrichtung

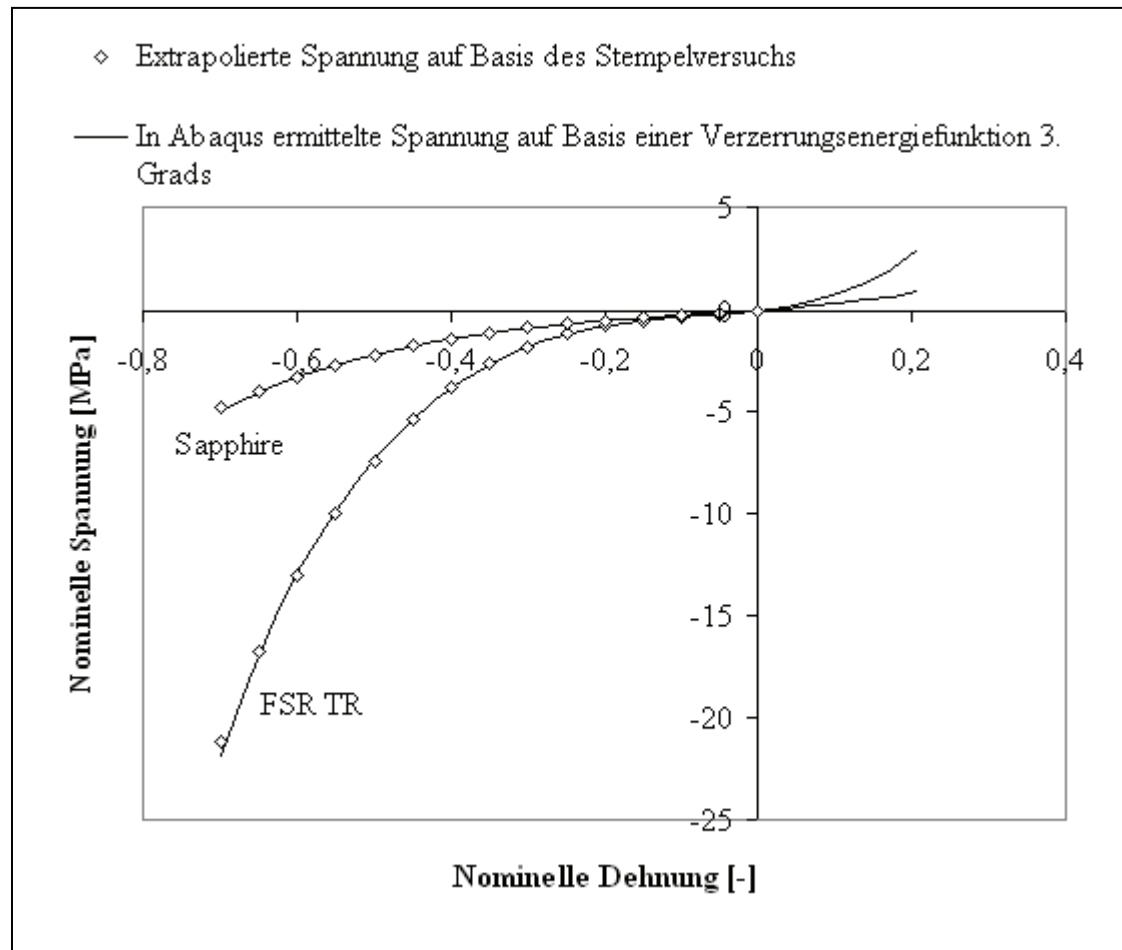
$$\epsilon_{33} < 0. \quad (5.34)$$

Die Bestimmung des Grads  $N$  der Verzerrungsenergiefunktion und dessen Parameter  $\alpha_i$  und  $\mu_i$  wird deshalb auf Basis eines Dehnungsbereichs von angenommen

$$I_\epsilon = [-70\%, +20\%] \quad (5.35)$$

(mit weitem Kompressionsteil) in Abaqus durchgeführt. Dazu wird in Abaqus ein finites Hexaederelement mit linearer Ansatzfunktion (lineares Element), dessen elastische Verhalten von der bereits ermittelten Spannungs-Dehnungs-Ausgleichskurve  $\Pi$  beschrieben wird, auf 70 % bzw. 20 % seiner Anfangslänge zusammengestaucht bzw. gedehnt und der Spannungs-Dehnungs-Verlauf für verschiedene Grade  $N$  simuliert und mit der experimentellen Kurve verglichen. Das Element soll derart gelagert werden, dass sich drei aufeinander senkrecht stehende Elementfacetten entlang ihrer Normalen nicht verschieben dürfen. Der diesen Facetten gemeinsame Knoten wird dadurch in allen Raumrichtungen festgehalten, und eine der restlichen Elementfacetten kann weggesteuert auf die Soll-Zusammenstauchung bzw. -Dehnung gebracht werden. Da Abaqus bei der Ergebnisdarstellung Spannungen als wahre Spannungen ausgibt, kann statt der Spannung die Reaktionskraft ausgewertet werden, sodass über den Anfangsquerschnitt des Elements die technische Spannung errechnet und mit der vorgegebenen Spannungs-Dehnungs-Ausgleichskurve  $\Pi$  direkt verglichen werden kann. Abbildung 5.10 gibt für die Drucktücher FSR TR und Sapphire zusammenfassend die experimentellen und rechnerischen Spannungs-Dehnungs-Kurven wieder. Für beide Drucktücher passt sich die simulierte Spannungs-Dehnungs-Kurve an der expe-

rimentellen Kurve für  $N = 3$  gut an. In Tabelle 5.5 sind die mit Abaqus gerechneten Materialparameter  $\alpha_i$  und  $\mu_i$  angegeben.



**Abbildung 5.10:** Experimentelle und rechnerische Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Luftpolsterschicht bei den Drucktüchern FSR TR und Sapphire. Die extrapolierte Kurve steht (nur bis zu einer gewissen Dehnung) auch für die aus dem Stempelversuch über dessen Ersatzmodell gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Wertepaare.

FSR TR				Sapphire		
i	$\mu_i$ [MPa]	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\mu_i$ [MPa]	$\alpha_i$	$\beta_i$
1	-2653,77	3,727	0	-148,96	3,999	0
2	1322,61	4,045	0	74,16	4,561	0
3	1333,46	3,426	0	76,15	3,487	0

**Tabelle 5.5:** Materialparameter für die schaumelastische Luftpolsterschicht. Querdehnzahl  $\nu_i = 0$ . Grad der Verzerrungsenergiefunktion  $N = 3$ .



Mit der Auswahl  $N = 3$  ist außerdem sichergestellt, dass im interessierenden Dehnungsbereich  $I_\varepsilon$  das Material für die Belastungsfälle ein-, äquibiaxialen und planaren Zug bzw. Druck, einfachen Schub sowie hydrostatischen Zug bzw. Druck, stabil ist. Als Stabilitätskriterium setzt Abaqus das Kriterium von D. C. DRUCKER ein [ABQ06], wonach die Materialsteifigkeitsmatrix

$$D = \frac{\partial^2}{\partial C \partial C} U \quad (5.36)$$

positiv definit sein muss, mit  $U$  der Verzerrungsenergiefunktion und  $C$  dem linken Cauchy-Green-Verzerrungstensor.

Wie bereits erwähnt wird die Deckschicht aufgrund ihrer im Vergleich zur Luftpolsterschicht hoher Volumensteifigkeit bzw. geringer Dehnung als linear elastisches Material behandelt. Als E-Modul wird die Anfangssteigung der aus dem Stempelversuch abgeleiteten Spannungs-Dehnungs-Ausgleichskurve genommen, etwa

$$E = \left. \frac{d}{d\varepsilon} \Pi(\varepsilon) \right|_{\varepsilon=0}. \quad (5.37)$$

Daraus ergibt sich für das Drucktuch FSR TR bzw. Sapphire ein E-Modul von 4,5 MPa bzw. 2,7 MPa bei der Querdehnzahl von 0,5.

#### 5.4.7 Materialmodell für die Drucktuchdicke beim inkompressiblen Drucktuch

Analog zu den kompressiblen Drucktüchern lässt sich für das inkompressible Drucktuch Opal das elastische Verhalten der Deckschicht, die als in Dickenrichtung einzige verformbare Komponente des Drucktuchs angenommen wurde, anhand eines hyperelastischen Materialgesetzes beschreiben. Die Ermittlung der dazu gehörenden Materialparameter kann wiederum in Abaqus durchgeführt werden. Die Auswertung verschiedener Verzerrungsenergiefunktionen zeigte, dass sich die experimentelle Spannungs-Dehnungs-Ausgleichskurve  $\Pi$  zum Drucktuch Opal gut mit einer Verzerrungsenergiefunktion nach Mooney-Rivlin beschreiben lässt [ABQ06]. Diese ist gegeben durch

$$U = C_{10}(I - 3) + C_{01}(II - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2. \quad (5.38)$$

$I$  und  $II$  bezeichnen dabei die Invarianten des linken Cauchy-Green-Verzerrungstensors.  $J$  ist die Jacobi-Determinante, die bei inkompressiblen Materialien nahe 1 liegt.  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  und  $D_1$  sind Materialparameter, die experimentell zu charak-

terisieren sind. Die Annahme der völligen Inkompressibilität der Deckschicht führt zur Jakobi-Determinante

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1. \quad (5.39)$$

Die Streckungen bei einachsigen Druck betragen dann

$$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, \lambda \right) = \left( \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}}, \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}}, 1+\varepsilon \right), \quad (5.40)$$

wobei  $\lambda$  bzw.  $\varepsilon$  wiederum die Streckung bzw. nominelle Dehnung in Lastrichtung „3“ bezeichnen. Damit ergeben sich der Deformationsgradient

$$F = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} \quad (5.41)$$

und die Dehnungsinvarianten

$$I = \text{tr}(FF^T) = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \quad (5.42)$$

$$II = \frac{1}{2} [I^2 - \text{tr}(FF^T FF^T)] = 2\lambda + \frac{1}{\lambda^2}. \quad (5.43)$$

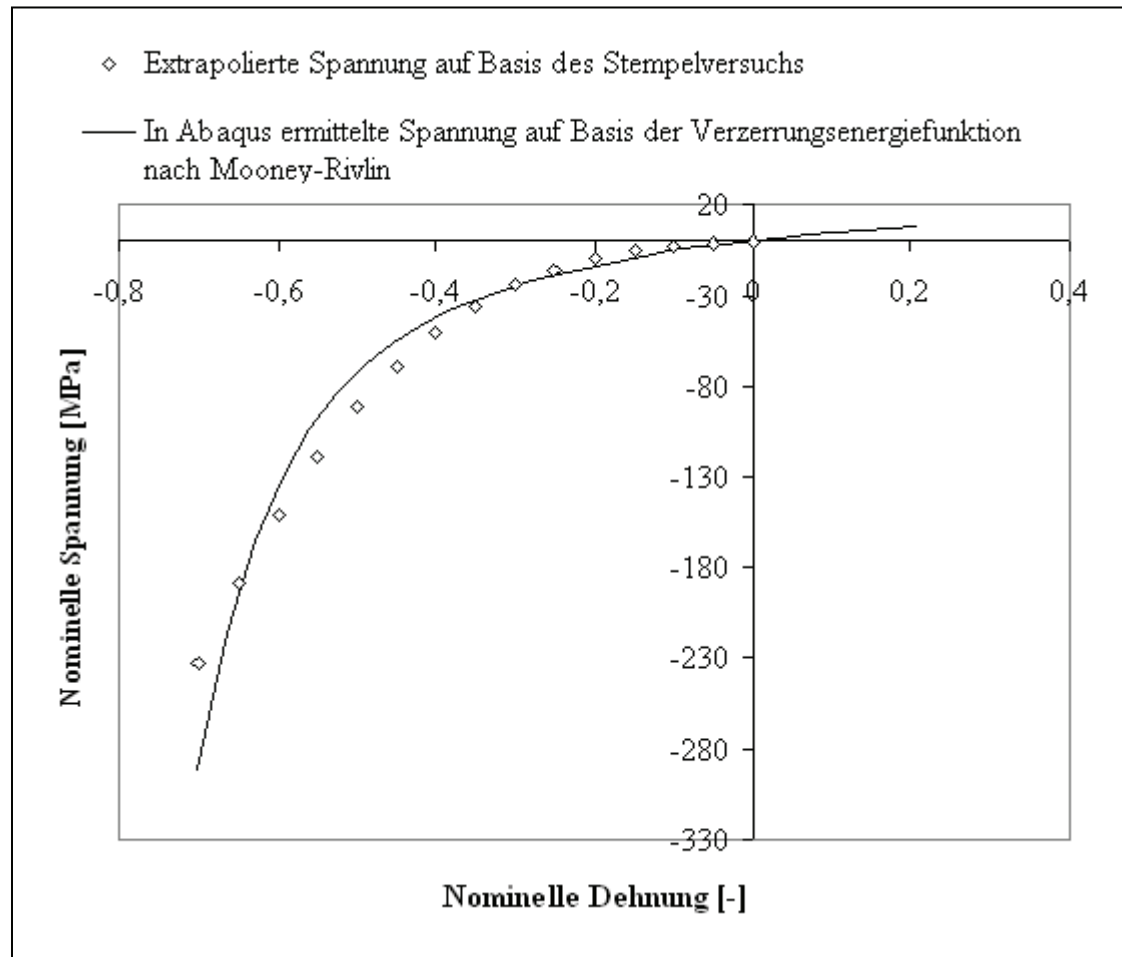
Die nominelle Spannung in Lastrichtung errechnet wiederum aus Gl. 5.30 mit Gln. 5.42 und 5.43 zu

$$T = 2 \left( 1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) (C_{10} \lambda + C_{01}) \quad (5.44)$$

und ist in Bezug auf die Materialkonstanten  $C_{10}$  und  $C_{01}$  linear. Damit können diese aus den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Wertepaaren über ein lineares Ausgleichsverfahren bestimmt werden [ABQ06]. Abbildung 5.11 zeigt die experimentelle und die in Abaqus errechnete Spannungs-Dehnungs-Kurve. Die ebenfalls in Abaqus errechneten Materialparameter  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  und  $D_1$  sind in Tabelle 5.6 angegeben. Für Zusammendrückungen größer als 70 % liefert die ermittelte Verzerrungsenergiefunktion nach Mooney-Rivlin zu hohe Spannungen. Diese liegt jedoch außerhalb des interessierenden Dehnungsbereichs  $I_e$ .

Verzerrungsenergiefunktionen mit polynomialem Ansatz höherer Ordnung führten im Spannungsverlauf zu Oszillationen. Andere Ansätze nach Ogden bzw. mit reduzierten

Polynomen (jeweils verschiedener Ordnungen) führten beim untersuchten Material zwar zu besserer Anpassung der errechneten Spannungen an die experimentellen, die Materialstabilität ist jedoch im interessierenden Dehnungsbereich  $I_\epsilon$  nicht gewährleistet [ABQ06].



**Abbildung 5.11:** Experimentelle und rechnerische Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Deckschicht bei Opal.

Opal		
$C_{01}$ [MPa]	$C_{10}$ [MPa]	$D_1$
2,36485070	5,58401687	0

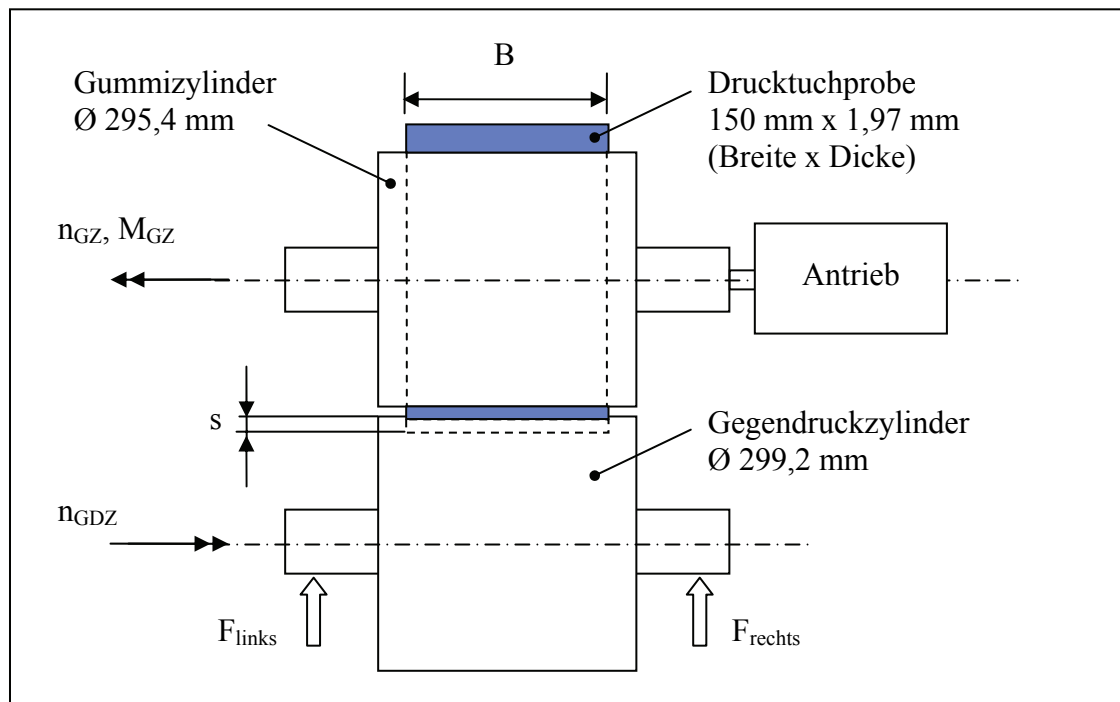
**Tabelle 5.6:** Materialparameter für die hyperelastische Deckschicht. Querdehnzahl  $\nu = 0,5$ . Verzerrungsenergiefunktion nach Mooney-Rivlin.

#### 5.4.8 Dynamisches Materialverhalten

Neben dem Stempelversuch bietet sich der seit einigen Jahren bei der Firma Conti-Tech etablierte Abrolltest als Testverfahren u. a. für die Dickenelastizität an. Im Ge-

gensatz zum Stempeltest handelt es sich beim Abrolltest um ein dynamisches Verfahren. Außerdem werden statt flacher Kontaktflächen zylindrische Flächen eingesetzt. Der Abrolltest soll im Folgenden kurz beschrieben und ausgewertet werden. Der entsprechende Prüfstand besteht aus einem angetriebenen Gummizylinder, auf dem das Drucktuch montiert ist, und einem durch Reibung mitgeschleppten Gegendruckzylinder, Abbildung 5.12. Im Gegensatz zum Bogenoffsetdruck laufen Gummi- und Gegendruckzylinder nicht winkelsynchron.

Zwischen Gummi- und Gegendruckzylinder wird eine definierte Eindrückung  $s$  eingestellt und der Gummizylinder auf konstante Drehzahl  $n_{GZ}$  beschleunigt. Gemessen wird u. a. die resultierende Kontaktnormalkraft  $F_N$ , sowohl eindrückungs- als auch geschwindigkeitsabhängig.

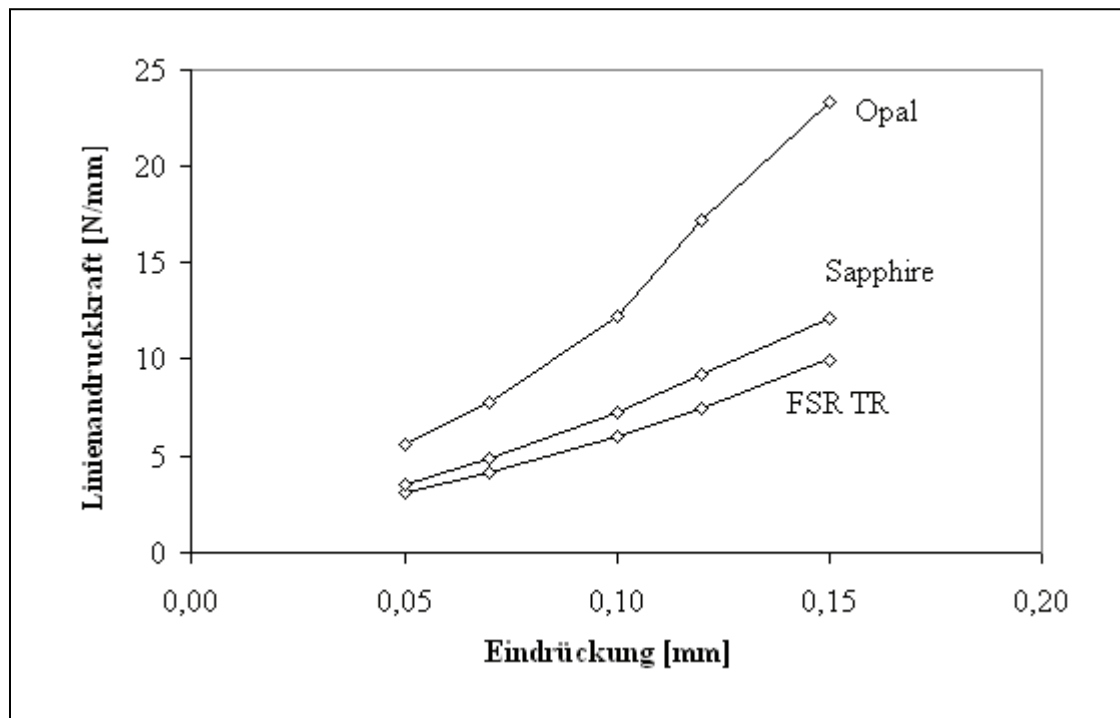


**Abbildung 5.12:** Abrollprüfstand der Firma ContiTech.  $B$ : Drucktuchbreite.  $n_{GZ}$ ,  $n_{GDZ}$ : Drehzahlen des Gummi- bzw. Gegendruckzylinders.  $M_{GZ}$ : Drehmoment am Gummizylinder.  $s$ : Eindrückung.  $F_{links}$ ,  $F_{rechts}$ : Normale Reaktionskraft am linken bzw. rechten Gegendruckzylinderlager.

Die aus der Kontaktnormalspannung resultierende Andruckkraft ergibt sich aus der Summe der radialen Reaktionskräfte, gemessen am linken und rechten Lager des Gegendruckzylinders. Bezogen auf die Drucktuchbreite  $B$ , lässt sich die Andruckkraft als Linienkraft

$$f_N = \frac{F_{links} + F_{rechts}}{B} \quad (5.45)$$

angeben und eindrückungsabhängig darstellen. Wie aus Abbildung 5.13 hervorgeht, nimmt die Andruckkraft bei allen Drucktüchern mit steigender Eindrückung zu, und zwar beim konventionellen Drucktuch Opal stärker als bei den kompressiblen Drucktüchern FSR TR und Sapphire. Aus dem Abrolltest werden zwar keine weiteren Materialkennwerte hergeleitet. Der Versuch bietet sich jedoch für Nachrechnungszwecke an.



**Abbildung 5.13:** Gemessene, eindrückungsabhängige Linienandruckkraft bei einer Druckgeschwindigkeit von 5 m/s.

In diesem Abschnitt wurden die in der Praxis etablierten Testverfahren für Drucktücher ausgewertet. Daraus konnten für das elastische Drucktuchverhalten in Drucktuchebene und in Dickenrichtung Materialmodelle ermittelt und entsprechende Materialkennwerte bestimmt werden. In Drucktuchebene konnten quasistatische, linearisierte E-Moduln in Kett- und Schussrichtung experimentell bestimmt werden. Für den Schubmodul konnte eine brauchbare Abschätzung hergeleitet werden. In Drucktuchdickenrichtung wurden zur Beschreibung des hyper- bzw. schaumelastischen Verhaltens der elastomeren Schichten geeignete Verzerrungsenergiefunktionen bestimmt.

Die gewonnenen Materialkennwerte erlauben nun eine numerische Behandlung der quasistatischen, dreidimensionalen Abrollung des Drucktuchs gegen Druckplatte und sind im Anhang 11.2 nochmals tabellarisch zusammengefasst.

### 5.5 Finite-Element-Modell

Die Überlegungen der letzten Abschnitte zur funktionsorientierten Aufteilung des Drucktuchs in tragende und druckende Bestandteile und die ermittelten Materialmodelle und -parameter werden nun in ein dreidimensionales Finite-Element-Modell umgesetzt. Dieses Modell soll später als Basis für verschiedene Analysen zugrunde gelegt werden, vor allem für die Abrollsimulation.

Da die Dickeneigenschaften beim Drucktuch eine sehr wichtige Rolle spielen, können für die elastomeren Schichten keine konventionellen Schalenelemente eingesetzt werden. Es werden vielmehr Solidelemente eingesetzt, die sich für ebene und zylindrische Strukturen einfach als Hexaederelemente generieren lassen, wie dies bei Drucktuchzugproben oder beim um den Gummizylinder gespannten Drucktuch der Fall ist, Abbildung 5.14a.

Da das Drucktuch außerdem auf die Druckplatte abgestützt abrollt, etwa durch die Mantelfläche des Gummizylinders, treten beim Abrollen überwiegend normale Druck- sowie Schub-, weniger jedoch Biegebelastungen auf, sodass die Kontaktzone mit linearen Solidelementen vernetzen werden kann. Dabei wird bei jeder elastomeren Schicht in Dickenrichtung ein einziges Element gesetzt.

Die Ermittlung der Elementkantenlänge in Zylinderumfangsrichtung (Druckrichtung) kann auf Basis der Abschätzung der Berührzonenlänge  $a_0$  erfolgen. Diese kann näherungsweise aus

$$a_0 = 2\sqrt{R s} \quad (5.46)$$

mit dem harmonischen Mittel

$$R = \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.47)$$

aus Drucktuchinnenradius  $R_1$ , Drucktuchaußenradius  $R_2$  und Eindrückung  $s$  [DÖR07]. Für  $R_1 = 110 \text{ mm}$  und  $R_2 = 111,97 \text{ mm}$  (typische Zylinderradien bei der MOZ-P-Druckmaschine, siehe Abbildung 2.9) sowie  $s = 0,15 \text{ mm}$  resultiert  $a_0 \approx 8 \text{ mm}$ . Zur Erfassung der tatsächlichen Kontaktlänge, -spannungen und -dehnungen sollen mehrere Elemente in Umfangsrichtung eingesetzt werden. Bei einer Netzfeinheit von 10 bis 20 Elementen pro Berührzonenlänge  $a_0$  ergeben sich Elementkantenlängen von 0,4 bis 0,8 mm, die in gleicher Größenordnung wie die Schichtdicken (Elementdicken) liegen.

Der Einsatz von Elementen mit quadratischer Formfunktion soll vermieden werden, da diese Elemente bei Kontaktrechnung in Abaqus oft ungünstiges Konvergenzverhalten zeigen. Darüber hinaus werden vollintegrierte Elemente eingesetzt, um durch Druckbelastung begünstigte Hourglassing-Effekte (spannungsfreie Verzerrungszustände) bei reduzierter Integration zu vermeiden. Die Deckschicht wird außerdem aufgrund ihrer Inkompressibilität zusätzlich mit Hybridformulierung berechnet [ABQ06].

Die Gewebeschichten benötigen entsprechend der Annahme, dass sie hauptsächlich in ihrer Ebene wirken, keine dreidimensionalen Elemente und werden mit Flächenelementen abgebildet, die durch Einlagen (so genannte Rebars<sup>1</sup>) jeweils in Kett- und Schussrichtung verstärkt sind, Abbildung 5.14b. Solche Elemente haben in ihrer Ebene keine Schubsteifigkeit, was jedoch für den Abrollvorgang keinen Nachteil darstellt, da Drucktücher auf den Gummizylinder ausschließlich gerade (also in Kettrichtung) montiert werden. Andererseits haben diese Elemente den großen Vorteil, dass sie mit wenigen Materialparametern auskommen, solange das Materialverhalten ausgeprägt eindimensional ist, wie im Falle der Gewebeschichten.

Wie in Abbildung 5.14b gezeigt, können Rebars als nebeneinander sitzende Drähte veranschaulicht werden. Die Drahtstruktur ist jedoch für die Berechnung nicht relevant. Vielmehr kommt es auf den gesamten Querschnitt an, die die Rebars zusammen bilden.

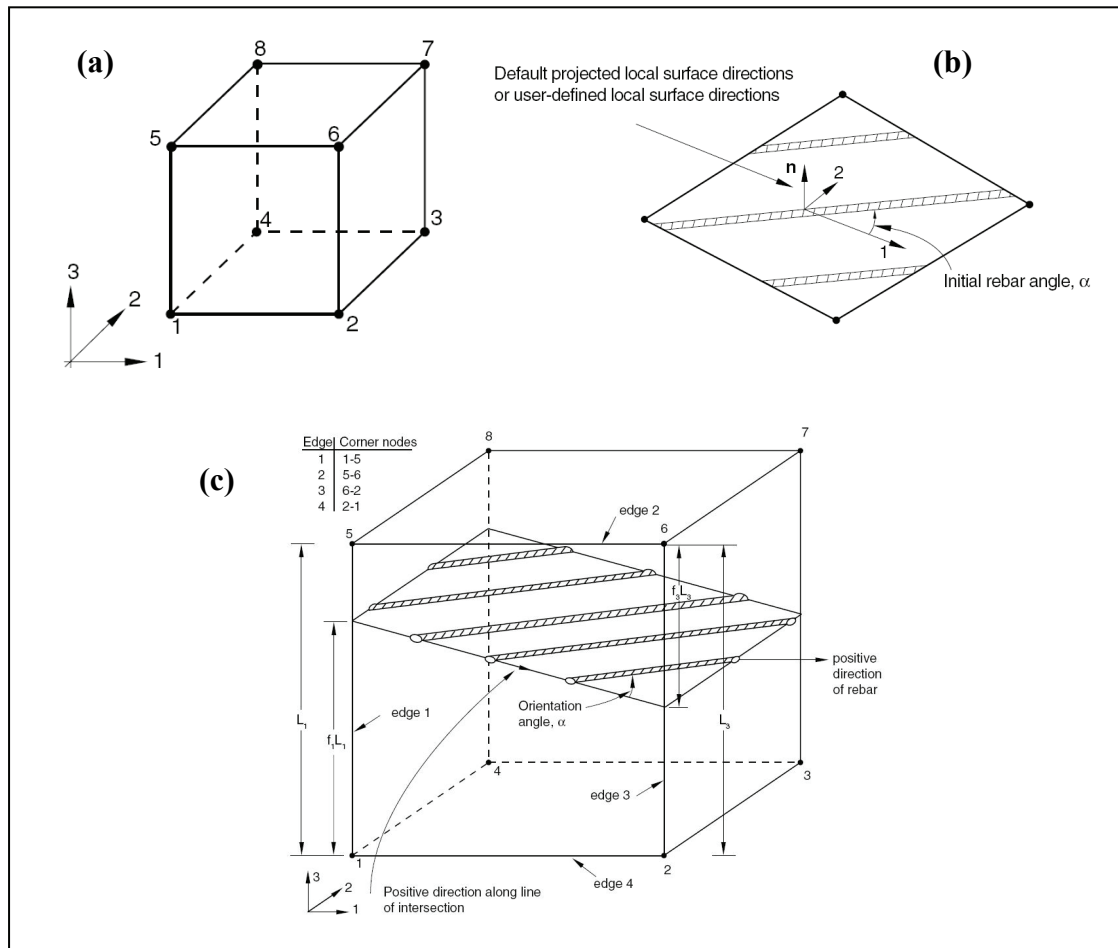
Rebar-Flächenelemente benötigen ein lokales Koordinatensystem, um die Orientierung der Rebars zu definieren. Sie können außerdem mit jedem Werkstoffgesetz versehen werden, berücksichtigen jedoch ausschließlich den oberen linken Term jeder Elastizitätsmatrix ( $D_{1111}$ ), der Normalspannung  $\sigma_{11}$  und Normaldehnung  $\varepsilon_{11}$  in Rebar-Richtung verknüpft. Infolge dessen würden Verzerrungen quer zur Rebar-Richtung im Element keine Spannungen hervorrufen, sodass Rebar-Flächenelemente nur in Verbindung mit Kontinuumelementen (z. B. Schalen- oder Solid-Elementen) eingesetzt werden sollen, um bei Berechnungen Singularitäten auszuschließen.

Wird eine Struktur mit Rebars versehen, so wird ihre Biegesteifigkeit ausschließlich dadurch beeinflusst, in welcher Höhe die Rebars in Dickenrichtung sitzen (Entfernung von der Neutralfaser.)

---

<sup>1</sup> Rebar: bedeutet im Englischen, eine Struktur mit Linienelementen zu verrippen, um sie in einer definierten Richtung zu versteifen.

Rebar-Flächenelemente lassen sich am Beispiel des Festigkeitsgewebes an der Außenseite der Luftpolsterschicht generieren, als würden Luftpolsterschicht und Festigkeitsgewebe gemeinsam eine Sandwichstruktur bilden. Für das im Inneren des Drucktuchs liegende Stabilisierungsgewebe können die Rebar-Flächenelemente an die Solid-Elemente durch Einbettung angebunden werden, wie in Abbildung 5.14c beispielhaft gezeigt ist.



**Abbildung 5.14:** Aufbau von Rebar-Flächen- und Solidelementen. (a) Lineares Hexaederelement mit acht Knoten und jeweils drei translatorischen Freiheitsgraden. (b) Lineares, Rebarverstärktes Flächenelement mit vier Knoten und drei Freiheitsgraden. „n“ bezeichnet die Normale zum Flächenelement. Die Rebars können unter einen Winkel  $\alpha$  in Bezug auf die 1-Richtung verlaufen. (c) Solid mit eingebetteter Rebar-Fläche [ABQ06].

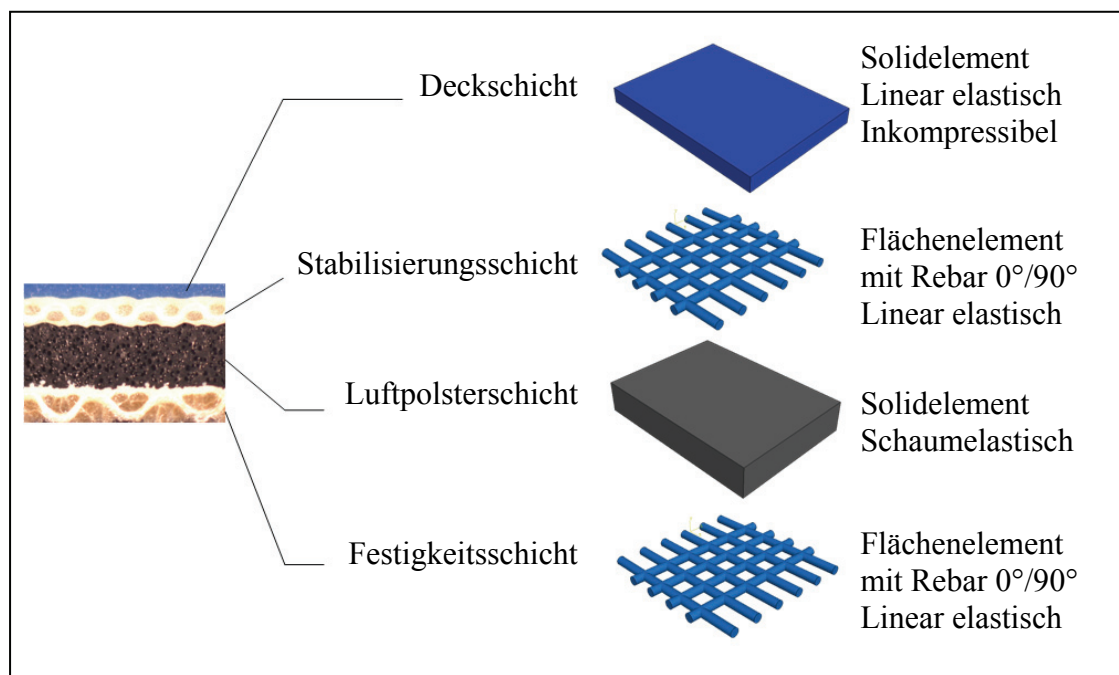
Alternativ zu den Rebar-Flächenelementen können die Gewebeschichten durch Membranelemente abgebildet werden. Diese stellen Kontinuums-elemente dar, die für FEM-Analysen auch eine Querdehnzahl und einen Schubmodul in ihrer Ebene verlangen. Eine Abschätzung des Schubmoduls wurde bereits im Abschnitt 5.4.4 angegeben.



Sollen Gewebeschichten eine Biegesteifigkeit zugeordnet bekommen, was hauptsächlich für die Stabilisierungsschicht sinnvoll ist, da sich das Festigkeitsgewebe vollständig an der Gummizylinderoberfläche anschmiegt und dadurch keine Durchbiegung erfahren kann, so können anstelle der Membranelemente konventionelle Schalenelemente eingesetzt werden, die jedoch bei der bereits abgeschätzten Netzfeinheit einen ungünstigen Schalenparameter

$$\lambda = \frac{H}{L} \quad (5.48)$$

mit  $H$  der Schalendicke und  $L$  der Schalenelementkantenlänge, aufweisen würden, was ihr Konvergenzverhalten verschlechtern kann [ABQ06], [SHL05]. Die Zuordnung der Solid- und Rebar-Flächenelementen zum Drucktuch und das für das jeweilige Element maßgebende Materialverhalten sind in Abbildung 5.15 zusammengefasst. Das auf dieser Weise gewonnene Finite-Element-Modell des Drucktuchs wird im Folgenden als Rebar-Modell bezeichnet.



**Abbildung 5.15:** Finite-Element-Modell des Drucktuchs (Rebar-Modell). Zuordnung der verschiedenen Solid- und Rebar-Elementen zum Schichtaufbau.

## 5.6 Herleitung homogenisierter Materialparameter

In diesem Abschnitt wird versucht, auf Basis des Rebar-Modells aus den elastischen Eigenschaften einzelner Schichten die elastischen Eigenschaften des gesamten Drucktuchs zu ermitteln. Das Rebar-Modell wird dadurch homogenisiert und kann mit dem

homogenisierenden Modell nach Michel verglichen werden [MIC99]. Dies soll eine Bewertungsgrundlage für das erstellte Rebar-Modell schaffen.

Im Folgenden werden als Indizes abkürzend FEST, STAB, LP und DS für Festigkeits-, Stabilisierung-, Luftpolster- und Deckschicht verwendet. Ebenfalls der kompakten Schreibweise halber werden die Raumrichtungen mit 1, 2 und 3 (für die Kett-, Schuss- und Dickenrichtung) bezeichnet, wie dies im Abschnitt 4.5 bereits dargestellt wurde. Außerdem enthält Tabelle 5.7 die Dicken der einzelnen Schichten, die bei der Ermittlung homogenisierter elastischer Kennwerte relevant sind.

	FSR TR	Sapphire	Opal
$t_{\text{FEST}}$ [mm]	0,57	1,07	1,27
$t_{\text{LP}}$ [mm]	0,6	0,25	-
$t_{\text{STAB}}$ [mm]	0,4	0,3	-
$t_{\text{DS}}$ [mm]	0,4	0,35	0,7

**Tabelle 5.7:** Dicken der einzelnen Schichten, ermittelt an mikroskopischen Querschnittsbildern. Alle Drucktuchdicken betragen 1,97 mm.

### 5.6.1 Elastizitätsmodul in Kettrichtung ( $E_1$ )

Der Elastizitätsmodul  $E_1$  des gesamten Drucktuchaufbaus in Kettrichtung wurde experimentell im Zugversuch ermittelt und wird entsprechend dem bei der Drucktuchmodellierung zugrunde gelegten Prinzip der Funktionstrennung alleine den Festigkeits- und Stabilisierungsschichten zugeordnet, wobei angenommen wurde, dass alle Gewebeschichten aus dem gleichen Material bestehen. Der E-Modul  $E_1$  wird im FE-Modell den in  $0^\circ$ -Richtung liegenden Rebars zugeordnet und gilt für Zugbelastung. Weniger relevant sind normale Druckbelastungen in  $0^\circ$ -Richtung, da das Drucktuch zum Drucken auf eine Dehnung von etwa +1,5 % vorgespannt wird.

### 5.6.2 Elastizitätsmodul in Schussrichtung ( $E_2$ )

Der ebenfalls im Zugversuch experimentell ermittelte Elastizitätsmodul  $E_2$  in Kettrichtung wird wiederum den Gewebeschichten bzw. den in  $90^\circ$ -Richtung liegenden Rebars zugeordnet. Im Gegensatz zur Kettrichtung ist hier der Einfluss der Steifigkeit elastomerer Schichten größer. Im Folgenden werden jedoch keine Korrekturen bezüglich Gewebe- und Elastomereigenschaften vorgenommen, sodass diese Eigenschaften weiterhin entkoppelt voneinander gehandhabt werden können. Die Dehnungen des

Drucktuchs in seiner Ebene sind klein: die Drucktuchebene wird als orthotrop, jedoch linear elastisch und zeitunabhängig betrachtet.

### 5.6.3 Elastizitätsmodul in Druckdickenrichtung ( $E_3$ )

Im Gegensatz zur Drucktuchebene verhält sich das Drucktuch in Dickenrichtung isotrop und nichtlinear elastisch. Dies ist im Wesentlichen auf die Eigenschaften elastomerer Bestandteile zurückzuführen, die außerdem als Träger zeitabhängiger Effekte (Viskoelastizität) angesehen werden können. Ein weiterer Unterschied zur Drucktuchebene besteht darin, dass das elastische Verhalten in Dickenrichtung bei Zugbelastung weniger relevant ist als bei Druckbelastung. Anhand der Verzerrungsenergiefunktionen zu den elastomeren Schichten kann auch ein linearisierter Elastizitätsmodul (E-Modul der unverformten Struktur) berechnet werden.

### 5.6.4 Querdehnzahl in Drucktuchebene ( $\nu_{12}$ )

Zur Bestimmung der Querdehnzahlen des gesamten Drucktuchs wird im Folgenden eine Abschätzung hergeleitet. Im Rahmen der linearen Theorie sind Spannungen und Dehnungen einer im Allgemeinen orthotropen Schicht in Materialhauptachsen über

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

miteinander verknüpft [BEC02], mit  $Q_{ij}$  den so genannten reduzierten Steifigkeiten einer Einzelschicht, die folgendermaßen definiert sind:

$$\begin{cases} Q_{11} = \frac{E_1}{1 - (\nu_{12})^2 \frac{E_2}{E_1}} \\ Q_{22} = \frac{E_2}{1 - (\nu_{12})^2 \frac{E_2}{E_1}} \\ Q_{12} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - (\nu_{12})^2 \frac{E_2}{E_1}} \\ Q_{66} = G_{12} \end{cases} \quad (5.50)$$

Aus den reduzierten Steifigkeiten lassen sich die so genannten Dehnsteifigkeiten  $A_{ij}$  des gesamten Drucktuchs errechnen [BEC02]. Diese verknüpfen die Dehnungen der



Insbesondere gilt

$$N_2 = 0 = A_{12} \varepsilon_1^{(0)} + A_{22} \varepsilon_2^{(0)}, \quad (5.54)$$

woraus die In-Plane-Querdehnzahl der gesamten Drucktuchkonstruktion

$$\nu_{12, \text{Drucktuch}} = -\frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (5.55)$$

resultiert, die in Tabelle 5.8 neben den Dehnsteifigkeiten  $A_{ij}$  für alle Drucktücher angegeben ist. Eine detaillierte Übersicht über das entsprechende Berechnungsschema ist im Anhang 11.3 angegeben.

	FSR TR	Sapphire	Opal
$A_{12}$ [N pro mm Drucktuchbreite]	1,2	0,63	2,2
$A_{22}$ [N pro mm Drucktuchbreite]	41,96	29,33	27,24
$\nu_{12, \text{Drucktuch}}$	0,03	0,02	0,08

**Tabelle 5.8:** Dehnsteifigkeiten und Querdehnzahlen in Drucktuchebene für drei Drucktücher.

### 5.6.5 Transversale Querdehnzahl ( $\nu_{13}$ )

Unter der Annahme, dass in jeder Schicht ein ebener Spannungszustand vorliegt, kann aus der Dehnung in Kettrichtung für jede Schicht die Dehnung in Dickenrichtung über

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= -\frac{\nu_{trans}}{1 - \nu_{trans}} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \\ &= -\frac{\nu_{trans}}{1 - \nu_{trans}} (1 - \nu_{12, \text{Drucktuch}}) \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (5.56)$$

errechnet werden [HAH92].  $\nu_{trans}$  bezeichnet dabei die Querdehnzahl einer Schicht in der (13)-Transversalebene. Bei den orthotropen Gewebeschichten ist  $\nu_{trans}$  gleich  $\nu_{13}$  zu setzen. Für die isotropen elastomeren Schichten entspricht  $\nu_{trans}$  einfach der Querdehnzahl des Materials.  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  in Gln. 5.56 bezeichnen die Längsdehnung infolge Belastung in 0°-Richtung und die dadurch hervorgerufene Querdehnung in 90°-Richtung. Alle Schichten erfahren idealisierend gleichermaßen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ , dehnen sich jedoch in Dickenrichtung unterschiedlich. Die resultierende Dehnung des gesamten Drucktuchs in Dickenrichtung errechnet sich aus den mit den Schichtdicken gewichteten Dehnungen einzelner Schichten zu

$$\varepsilon_{3, Drucktuch} = -(1 - \nu_{12, Drucktuch}) \varepsilon_1 \frac{1}{t_{Drucktuch}} \sum_{Schicht 1}^{Schicht N} \left( \frac{\nu_{trans}}{1 - \nu_{trans}} \right) t_{Schicht}, \quad (5.57)$$

woraus sich die Querdehnzahl  $\nu_{13}$  des Drucktuchs zu

$$\nu_{13, Drucktuch} = (1 - \nu_{12, Drucktuch}) \frac{1}{t_{Drucktuch}} \sum_{Schicht 1}^{Schicht N} \left( \frac{\nu_{trans}}{1 - \nu_{trans}} \right) t_{Schicht} \quad (5.58)$$

ergibt. Wird angenommen, dass die Gewebeschichten und die Luftpolsterschicht bei Belastung in 0°-Richtung sich in Dickenrichtung nicht dehnen ( $\nu_{trans}=0$ ), so vereinfacht sich Gl. 5.58 zu

$$\nu_{13, Drucktuch} = (1 - \nu_{12, Drucktuch}) \frac{t_{DS}}{t_{Drucktuch}} \frac{\nu_{DS}}{1 - \nu_{DS}} \quad (5.59)$$

mit den Werten in Tabelle 5.9.

	FSR TR	Sapphire	Opal
$\nu_{13, Drucktuch}$	0,19	0,17	0,32

**Tabelle 5.9:** Transversale Querdehnzahlen  $\nu_{13}$  des gesamten Drucktuchs.

### 5.6.6 Bedingungen für Kontraktionsfreiheit in Dickenrichtung

Nach Gl. 5.57 würde sich das Drucktuch bei einer Zugbelastung in Kettrichtung keine Dehnung in Dickenrichtung erfahren, wenn

$$\nu_{12, Drucktuch} = 1 \quad \text{oder} \quad (5.60)$$

$$\sum_{Schicht 1}^{Schicht N} \left( \frac{\nu_{trans}}{1 - \nu_{trans}} \right) t_{Schicht} = 0. \quad (5.61)$$

Gln. 5.61 und 5.62 stellen die Bedingungen für Drucktücher dar, die beim Aufspannen im linear elastischen Bereich an Dicke nicht verlieren, im Folgenden als Drucktücher mit KF-Eigenschaft zu bezeichnen (KF: kontraktionsfrei). Bedingung 5.60 wird dann erfüllt, wenn entsprechend Gl. 5.55

$$A_{12} = A_{22} \quad (5.62)$$

gilt, ist jedoch in der Praxis nicht zu verwirklichen, da stattdessen Drucktücher angestrebt werden, die in ihrer Ebene dimensionsstabil sind ( $\nu_{12, Drucktuch} \rightarrow 0$ ). Es soll also eher versucht werden, die Bedingung 5.62 zu erfüllen. Ausgeschrieben wird Gl. 5.61 zu

$$\frac{\nu_{DS} t_{DS}}{1 - \nu_{DS}} + \frac{\nu_{LP} t_{LP}}{1 - \nu_{LP}} + \frac{\nu_{13, FEST} t_{FEST}}{1 - \nu_{13, FEST}} + \frac{\nu_{13, STAB} t_{STAB}}{1 - \nu_{13, STAB}} = 0. \quad (5.63)$$

Unter der Annahme, dass die Deckschicht vollkommen inkompressibel ist ( $\nu = 0,5$ ), die Dicken der einzelnen Schichten fest vorgegeben sind und die Gewebeschichten in den Transversalebene querdehnungsarm sind ( $\nu_{trans} \rightarrow 0$ ) ergibt sich die Querdehnzahl, die die Luftpolsterschicht haben soll, um ein Drucktuch mit KF-Eigenschaft zu erzielen zu

$$\nu_{LP, KF-Drucktuch} = \frac{1}{1 - \frac{t_{LP}}{t_{DS}}}. \quad (5.64)$$

Da die Luftpolsterschicht meistens dicker ist als die Deckschicht, müsste die Luftpolsterschicht nach Gl. 5.64 eine negative Querdehnzahl aufweisen (die dann die Kontraktion der Deckschicht kompensiert), um ein Drucktuch mit KF-Eigenschaft zu verwirklichen. Eine Luftpolsterschicht, die viermal so dick wie die Deckschicht ist, müsste eine Querdehnzahl von  $-1/3$  aufweisen.

### 5.6.7 Transversale Querdehnzahl ( $\nu_{23}$ )

Die Querdehnzahl  $\nu_{23}$  ist im Hinblick auf das Verhalten des Drucktuchs beim Aufspannen weniger relevant als  $\nu_{13}$ , da das Aufspannen in Kettrichtung erfolgt.  $\nu_{23}$  lässt sich analog  $\nu_{13}$  ermitteln, wenn die Belastung in Schuss- statt in Kettrichtung aufgebracht werden würde, also durch Vertauschung der 1- und 2-Richtungen bzw. durch Drehung des Drucktuchs um die 3-Achse, Tabelle 5.10.

	FSR TR	Sapphire	Opal
$\nu_{23}$ , Drucktuch	0,2	0,17	0,35

**Tabelle 5.10:** Transversale Querdehnzahlen  $\nu_{23}$ .

### 5.6.8 Schubmodul in Drucktuchebene ( $G_{12}$ )

Für die reine Luftpolsterschicht ergibt sich der linearisierte Schubmodul  $G_{12}$  (wird in Anlehnung an die Lamé-Konstanten mitunter auch als  $\mu_0$  notiert) für die Verzerrungsenergiefunktion nach Gl. 5.29 aus

$$G_{LP} = \sum_{i=1}^{i=3} \mu_i \quad (5.65)$$

[ABQ06]. Für die als linear elastisch angenommene Deckschicht ergibt sich der Schubmodul aus

$$G_{DS} = \frac{E_{DS}}{2(1 + \nu_{DS})} \quad (5.66)$$

mit der Querdehnzahl  $\nu_{DS} = 0,5$ . Der linearisierte Schubmodul der hyperelastischen Deckschicht beim konventionellen Drucktuch Opal ergibt sich aus

$$G_{DS} = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (5.67)$$

[ABQ06]. Für die Schubsteifigkeit der Gewebeebene werden Schätzwerte nach Tabelle 5.3 eingesetzt. Analog zur Querdehnzahl  $\nu_{12}$  kann der aus allen Schichten resultierende Schubmodul in Drucktuchebene entsprechend Gl. 5.52 aus der Dehnsteifigkeit  $A_{66}$  über

$$G_{12, \text{Drucktuch}} = \frac{1}{t_{\text{Drucktuch}}} A_{66} \quad (5.68)$$

errechnet werden, Tabelle 5.11.

	FSR TR	Sapphire	Opal
$A_{66}$ [N/mm]	17,47	6,95	8,84
$G_{12, \text{Drucktuch}}$ [MPa]	8,8	3,5	4,5

**Tabelle 5.11:** Inplane-Schubmodul  $G_{12}$ .

### 5.6.9 Transversaler Schubmodul ( $G_{13}$ )

Der Schubmodul in der (13)-Transversalebene lässt sich dadurch bestimmen, dass die elastomeren Schichten als in Reihe geschaltete, schubelastische Elemente aufgefasst werden. Die Gewebeschichten werden nach wie vor als schubstarr ( $G \rightarrow \infty$ ) angesehen.

Der Schubmodul  $G_{13}$  des gesamten Drucktuchs ergibt sich dann aus

$$\frac{t_{\text{Drucktuch}}}{G_{13, \text{Drucktuch}}} = \frac{t_{DS}}{G_{DS}} + \frac{t_{LP}}{G_{LP}} + \underbrace{\frac{t_{FEST}}{G_{FEST}} + \frac{t_{STAB}}{G_{STAB}}}_{=0} \quad (5.69)$$

mit den Werten in Tabelle 5.12.

	FSR TR	Sapphire	Opal
$G_{13, \text{Drucktuch}}$ [MPa]	3,7	3,4	4,4

**Tabelle 5.12:** Schubmodul in der (13)-Transversalebene.



### 5.6.10 Transversaler Schubmodul ( $G_{23}$ )

Da der transversale Schubmodul nach dem erstellten Drucktuchmodell von den elastomeren Schichten bestimmt wird, die keine vorzügliche Materialrichtung haben, dürfen die Richtungen 1 und 2 vertauscht werden, um

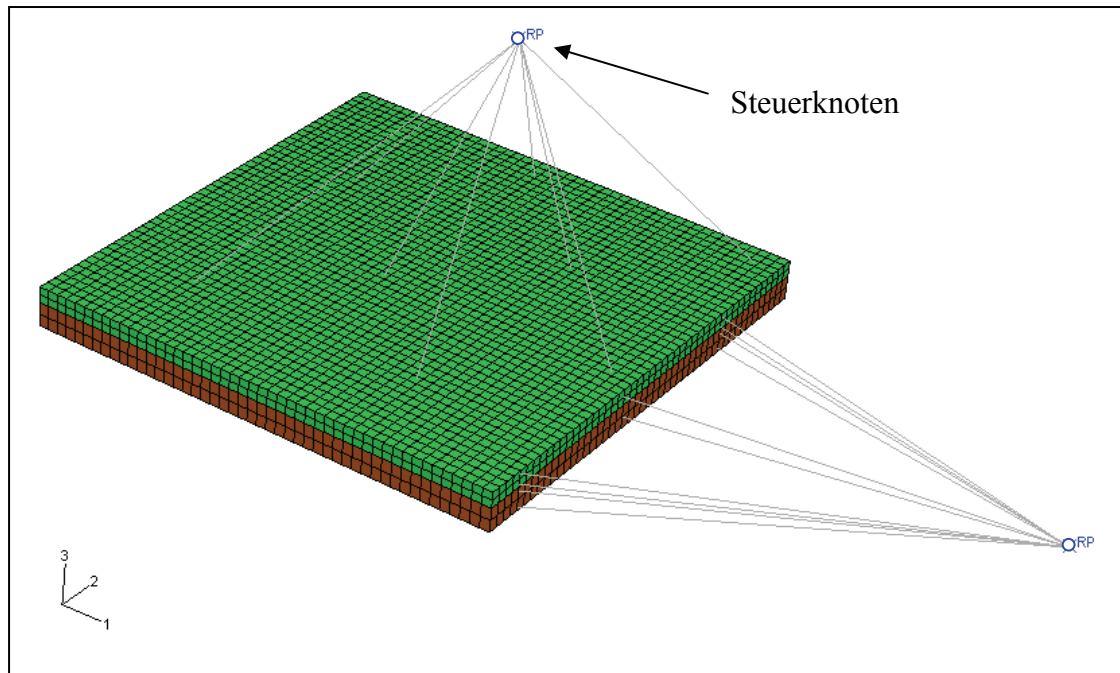
$$G_{23, \text{Drucktuch}} = G_{13, \text{Drucktuch}} \quad (5.70)$$

zu erhalten, mit den Werten wie in Tabelle 5.12.

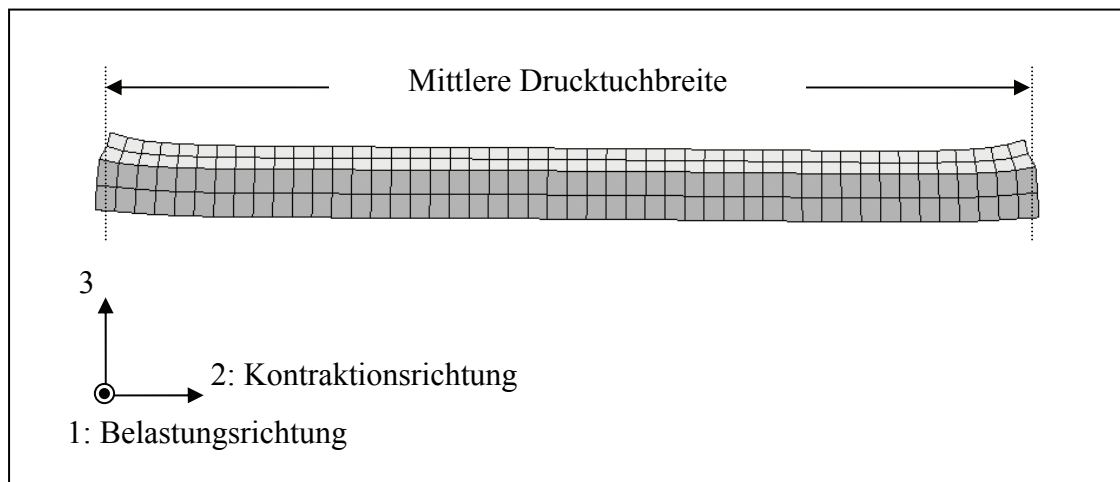
### 5.6.11 Homogenisierung mit der Finite-Element-Methode

Die Ermittlung der homogenisierten Querdehnzahlen und Schubmoduln kann auch numerisch anhand eines FE-Modells erfolgen. Die Elastizitätsmoduln des gesamten Drucktuchs in Kett-, Schuss- und Dickenrichtung wurden bereits auf experimenteller Basis bestimmt und werden in diesem Abschnitt nicht behandelt.

Das FE-Modell zur Bestimmung transversaler elastischer Kenngrößen besteht aus den beiden mit linearen Hexaederelementen diskretisierten elastomeren Schichten und den Rebar-Flächenelementen, Abbildung 5.17. Letzte sind als Flächen auf der Abbildung nicht sichtbar. Eine Drucktuchseite lässt sich an einem (Steuer-) Knoten (master node) kinematisch koppeln (so genannte MPC: multiple point constraint), sodass Querschnittsverschiebungen und für das gesamte Drucktuch resultierende Reaktionskräfte einfach an den Steuerknoten alleine ausgewertet werden können. Über die Steuerknoten lassen sich außerdem elementare Normal- und Schubbelastungen einleiten. So ergeben sich durch Normalzug in 1-Richtung und Ermittlung der damit verbundenen Querschnittskontraktion in 2- bzw. 3-Richtung die Querdehnzahlen  $\nu_{12}$  sowie  $\nu_{13}$ . Da der Querschnitt in der (23)-Ebene bei Zugbelastung in 1-Richtung sich verkrümmen kann, wird für die Querschnittskontraktion in 2-Richtung ein Mittelwert gebildet, Abbildung 5.18. Analog dazu ergibt sich die Querdehnzahl  $\nu_{23}$  aus der Dickenveränderung bei einer Normalzugbelastung in 2-Richtung. Die Schubmoduln  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  und  $G_{23}$  ergeben sich durch reine Schubbelastung in der entsprechenden Ebene, Auswertung der dadurch hervorgerufenen Scherdehnungen und abschließend Linearisierung der resultierenden Spannungs-Dehnungs-Kurve um den unverformten Zustand.



**Abbildung 5.17:** FE-Modell zur Ermittlung homogener Querdehnnzahlen und Schubmoduln. Abmessungen: 10 mm x 10 mm x 1,97 mm. Die Fäden zu den Drucktuchseitenflächen symbolisieren die kinematische Kopplung zwischen Steuerknoten und jeweiligem Querschnitt (weitere Steuerknoten sind nicht dargestellt.)



**Abbildung 5.18:** Ermittlung der Querdehnnzahl  $v_{12}$  mit der FEM. Für die Drucktuchbreite im verformten Zustand wird aufgrund der Querschnittsverkrümmung ein Mittelwert gebildet (Abweichend von dem Rebar-Modell sitzen hier über die Dicke jeder elastomeren Schicht zwei Solid-Elemente, da die Modellgröße dies noch zulässt.)

Tabelle 5.13 zeigt am Beispiel des Drucktuchs FSR TR, dass die Ergebnisse der FEM-Simulation mit den Ergebnissen des in den letzten Abschnitten homogenisierten Rebar-Modells gut übereinstimmen, bis auf den Schubmodul  $G_{12}$  in Drucktuchebene.

Würden statt Rebar- Membranelemente eingesetzt, so würden die Ergebnisse auch bei  $G_{12}$  miteinander gut übereinstimmen.

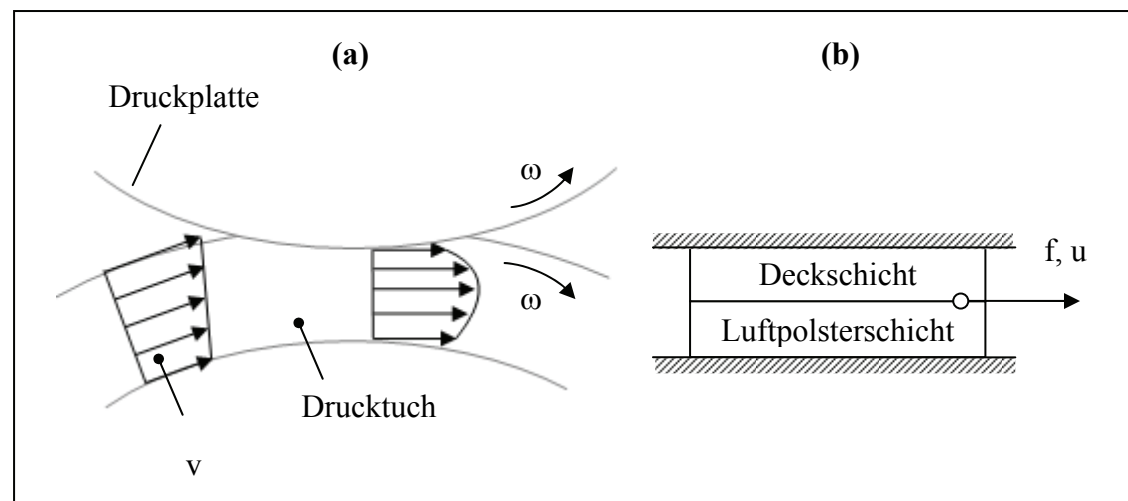
	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{23}$	$G_{12}$ [MPa]	$G_{13}$ [MPa]	$G_{23}$ [MPa]
Analytische Lösung	0,03	0,19	0,2	8,8	3,7	3,7
Lösung mit der FEM	0,05	0,19	0,2	1,05	3,82	3,82

**Tabelle 5.13:** Schubmodul in der Transversalebene (13).

### 5.6.12 Stabilisierende Wirkung der Gewebeschichten

Die transversale Schubsteifigkeit des Drucktuchs würde nach dem vorgestellten Rebar-Modell und Gl. 5.69, insbesondere nach der Annahme, dass die Gewebeschichten in Transversalebene schubstarr sind, von den Gewebeschichten nicht abhängen. D. h., würde sich das Drucktuch bei Schubbelastung in einer Transversalebene ungehindert verformen können, so würden die Gewebeschichten keine verstärkende Wirkung auf das gesamte Drucktuchverhalten entfalten.

Beim Abrollen von Drucktuch und Druckplatte können jedoch an Drucktuchober- und -unterseite Randbedingungen auftreten, die eine freie Verformung nicht zulassen. So zeigt Abbildung 5.19a, wie ein Zustand des Haftens in der Kontaktzone zwischen Drucktuch und Druckplatte die Drucktuchoberseite auf die Geschwindigkeit der Druckplattenoberfläche reduzieren kann.

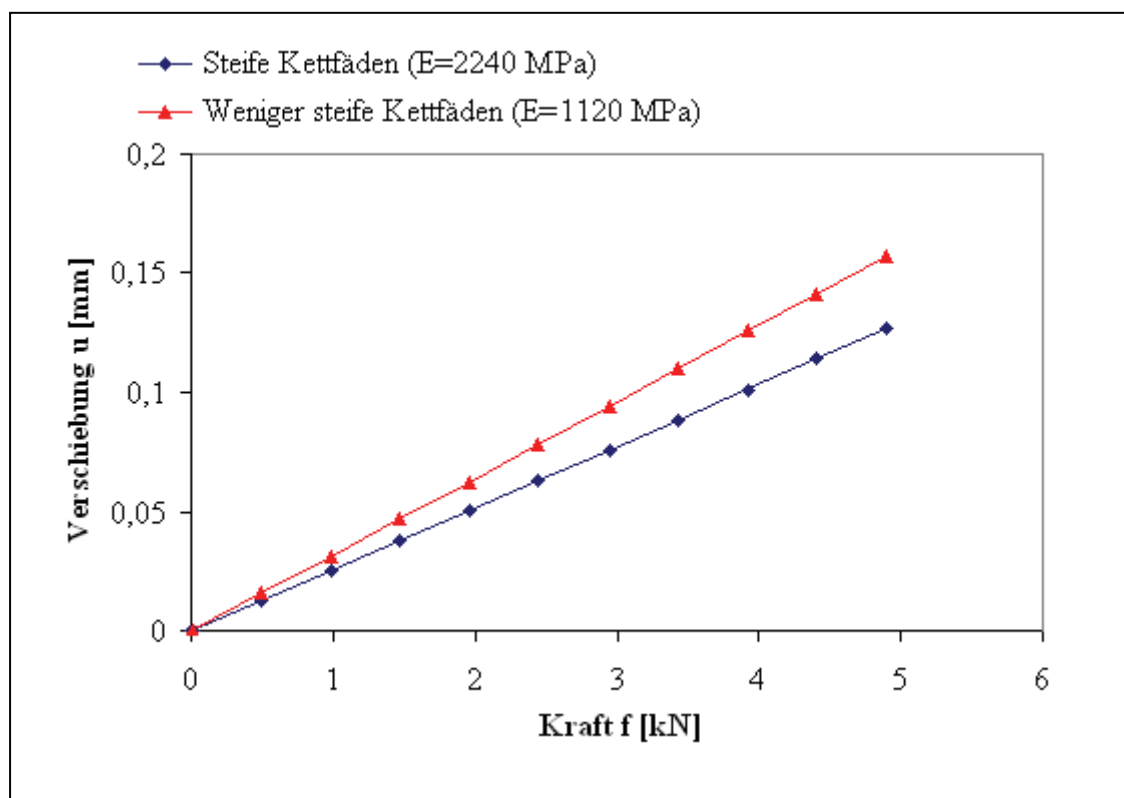


**Abbildung 5.19:** Geschwindigkeitsverteilung über die Drucktuchdicke für  $\varnothing_{\text{Drucktuch}} > \varnothing_{\text{Druckplatte}}$ . (a) Geschwindigkeitsprofil im und außerhalb der Kontaktzone. (b) Mechanisches Ersatzmodell.  $f$ : Pullout-Kraft (bezogen auf die Drucktuchbreite).  $u$ : Verschiebung.  $v$ : Umfangsgeschwindigkeit.  $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit.

Die höheren Geschwindigkeiten würden also zwischen Drucktuchober- und -unterseite auftreten und für ein Abscheren der mittleren Drucktuchebenen sorgen.

Welche Rolle das Gewebe in der Stabilisierung des Drucktuchaufbaus spielt, kann anhand eines mechanischen Ersatzmodells untersucht werden, bei dem Drucktuch bei festgehaltener Ober- und Unterseite durch eine Pullout-Kraft  $f$  belastet wird und dabei die Verschiebung  $u$  des Lastangriffspunkts berechnet wird, Abbildung 5.19b. Für die Berechnung kann z. B. das FE-Modell nach Abbildung 5.17 eingesetzt werden. Aufgrund der Festhaltung der unteren Drucktuchseite kann hier auf die Modellierung des Festigkeitsgewebes verzichtet werden.

Die in Abhängigkeit der Last  $f$  berechnete Verschiebung  $u$  zeigte, dass ein in  $0^\circ$ -Richtung steiferes Stabilisierungsgewebe zu geringeren Verschiebungen führt, woraus die stabilisierende Wirkung des Gewebes auf die Drucktuchkonstruktion im Hinblick auf „innere“ Schubverformung folgt, Abbildung 5.20.



**Abbildung 5.20:** Kraft-Verschiebungs-Kurven bei Pullout-Belastung für verschiedene Steifigkeiten der Kettfäden der Stabilisierungsschicht am Beispiel des Drucktuchs FSR TR. FE-Modell wie in Abbildung 5.17.

### 5.6.13 Vergleich des homogenisierten Rebar-Modells mit dem Modell nach Michel

Werden nun die auf Basis des Rebar-Modells ermittelten elastischen Materialparameter des gesamten Drucktuchaufbaus mit denen nach dem Modell von Michel einander gegenübergestellt, so kann festgestellt werden, dass die auf verschiedenen Ansätzen basierenden Modellen (Michel-Modell: Experiment, Rebar-Modell: Experiment, Abschätzung, Annahmen bezüglich Drucktuchtragverhalten) vergleichbare Ergebnisse liefern, Tabelle 5.14, [MIC99]. Die Abweichungen in den E-Moduln in Kett- und Schussrichtungen können dadurch begründet werden, dass im Rahmen beider Arbeiten unterschiedliche Materialien untersucht wurden. Die Abweichungen in den Schubmoduln und Querdehnzahlen können dagegen auf die beim Rebar-Modell getroffenen Annahmen bezüglich der Dicken-, Schubstarrheit und Querkontraktionsfreiheit der Gewebeschichten sowie der verschwindenden Querdehnzahl der Luftpolsterschicht zurückgeführt werden.

	FSR TR	Sapphire	Opal	Werte nach Michel
$E_1$ [MPa]	2240	1500	1990	800 – 1000
$E_2$ [MPa]	38	15	18	12 – 22
$E_3$ [MPa]	4,5	2,7	4,7	10 – 26
$G_{12}$ [MPa]	8,8	3,5	4,5	5 – 7
$G_{13}$ [MPa]	3,7	3,4	4,4	1,5 – 3
$G_{23}$ [MPa]	3,7	3,4	4,4	1,5 – 2,5
$\nu_{12}$	0,03	0,02	0,08	$\approx 0$
$\nu_{13}$	0,19	0,17	0,32	0,5 – 1,8
$\nu_{23}$	0,2	0,17	0,35	0,4 – 1

**Tabelle 5.14:** Vergleich der elastischen Drucktucheigenschaften beim homogenisierten Rebar-Modell und dem Modell nach Michel [MIC99].

Zusammengefasst können die Ergebnisse, die das Rebar-Modell bei der Simulation des elastischen Verhaltens des gesamten Drucktuchaufbaus in Bezug auf elementare Belastungen (Zug, Druck, Schub und Querkontraktion) liefert, als realistisch sowie als gute Richtwerte betrachtet werden und werden bei der folgenden Simulation der Abrollung von Drucktuch und Druckplatte zugrunde gelegt. Im Anhang 11.4 sind die

wesentlichen Merkmale des Rebar-Modells samt aller dazu gehörigen Materialparameter und Verfahren zu ihrer Gewinnung tabellarisch zusammengefasst.

### 5.7 Dreidimensionale Simulation des Abrollvorgangs

Im Prinzip kann mit dem im letzten Abschnitt homogenisierten Rebar-Modell auch die Simulation der Abrollung von Drucktuch und Druckplatte durchgeführt werden. Dies ist jedoch in Abaqus nicht direkt möglich, da Orthotropie in Abaqus derzeit zwar mit linear elastischem, nicht jedoch mit schaum- oder hyperelastischem Materialgesetz, das für die Drucktuchdickenrichtung ja wichtig ist, kombiniert werden kann. Die folgende Abrollsimulation wird deshalb mit dem die einzelnen Schichten differenzierenden Rebar-Modell durchgeführt und soll sich auf den Fall kompressibler Drucktücher beschränken.

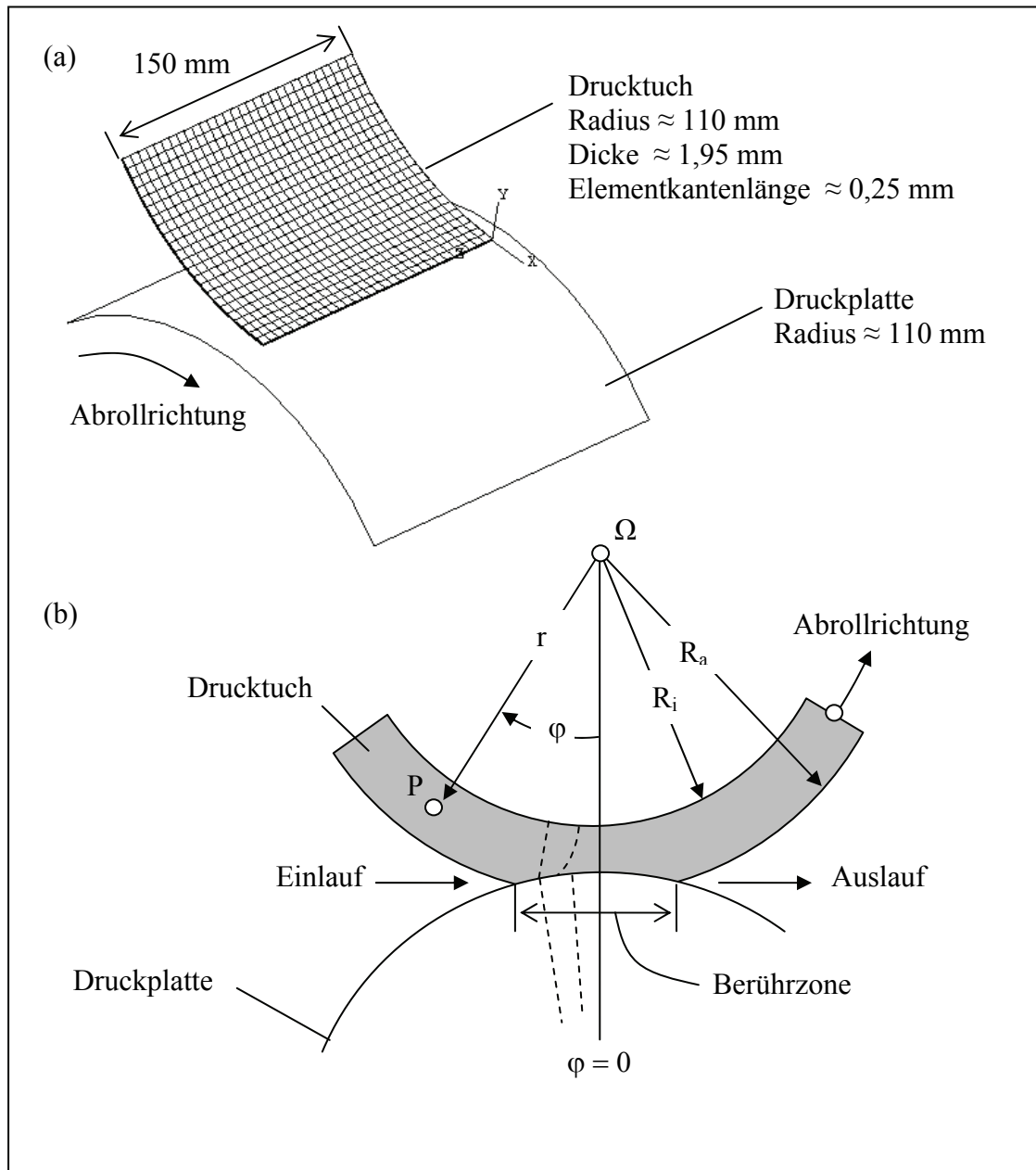
#### 5.7.1 Modellierung des rollenden Kontakts zwischen Druckplatte und Drucktuch

Die Druckplatte wird als unverformbare Oberfläche (Starrkörper) betrachtet. Diskretisiert wird also nur das Drucktuch entsprechend dem Rebar-Modell. D. h., Deck- und Luftpolsterschicht werden mit Solidelementen vernetzt, wobei über die Dicke jeder Schicht ein einziges Element sitzt, während die Gewebeschichten mit Rebar-Flächenelementen vernetzt werden. Um die Größe des Finite-Element-Modells und somit den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wird nur ein Viertel der Zylinderbreite bzw. des Zylinderumfangs modelliert, Abbildung 5.21a.

Abbildung 5.21b definiert für das Drucktuch ein Polarkoordinatensystem  $(r, \varphi)$  mit dem Ursprung  $\Omega$  auf der Gummizylinderachse. Dieses Koordinatensystem ist ortsfest, rotiert also bei der Abrollung nicht mit. Die Winkelkoordinate  $\varphi$  ist auf der Vertikalen null. Dadurch wird die Berührzone in zwei Bereiche aufgeteilt: die Einlaufzone mit  $\varphi < 0$  und die Auslaufzone mit  $\varphi > 0$ .

Auf die Modellierung des Kontakts zwischen Drucktuchunterseite und Unterlegbogen bzw. Gummizylindermantelfläche wird der Einfachheit halber verzichtet. Der Kontakt an der Drucktuchunterseite wurde in der Dissertation von Michel behandelt [MIC99]. Es wird an dieser Stelle angenommen, dass das Drucktuch an der Gummizylindermantelfläche perfekt haftet, sodass auf die Modellierung der Drucktuchvorspannung verzichtet wird. Durch diese Annahme würde das Festigkeitsgewebe bei der Abrollung

keine Funktion übernehmen, sodass von den Gewebebestandteilen des Drucktuchs lediglich die Stabilisierungsschicht modelliert wird.



**Abbildung 5.21:** Finite-Element-Modell zur Simulation des rollenden Kontakts zwischen Druckplatte und Drucktuch. (a) Dreidimensionales Finite-Element-Modell mit einem Viertel Zylinderumfang. (b) Schnittdarstellung mit Polarkoordinatensystem.  $r$ : Radius.  $R_i$ ,  $R_a$ : Drucktuchinnen- und -außenradius.  $\varphi$ : Umfangscoordinate.  $\Omega$ : Koordinatenursprung.  $P$ : Punkt auf dem Drucktuch.

Bezüglich des Kontakts zwischen Drucktuchoberseite und Druckplatte setzte Michel in seiner Simulation ein Reibungsmodell ein, das zwischen den Reibungszuständen Haften und Gleiten unterscheidet [MIC99]. Er ermittelte experimentell zwischen einer gefeuchteten Druckplatte (Aluminium) und verschiedenen Drucktüchern (Gummi)

Haft- und Gleitreibungskoeffizienten, die mit zunehmendem Anpressdruck von etwa 1,5 auf etwa 0,5 exponentiell abfallen. Im Folgenden wird für beide Reibungszustände vereinfachend mit einem mittleren, anpressdruckunabhängigen Reibungskoeffizienten von  $\mu = 1$  gerechnet.

Je nachdem, welches Drucktuch bei welchen Zylinderdurchmessern modelliert wird, können die in Tabelle 5.15 zusammengefassten Berechnungsvarianten definiert werden. Anhand der Berechnungsvarianten wird versucht, den Einfluss des Durchmesser- verhältnisses sowie des Drucktuchs auf den Anpressdruck sowie den Schlupf (relative Gleitbewegung zwischen Drucktuch- und Druckplattenoberfläche) in der Berührzone zu simulieren.

Für die beiden Drucktücher FSR TR und Sapphire wird der Drucktuchaußendurchmesser im Montagezustand (ohne Berücksichtigung der Eindrückung) einmal kleiner (Durchmesserverhältnis I) und einmal größer (Durchmesserverhältnis II) gewählt als der der montierten Druckplatte. Die daraus resultierenden vier Berechnungsvarianten werden im Rahmen von quasistatischen Finite-Element-Analysen durchgeführt, bei denen der Drucktuchquadrant und die Druckplatte um einen Winkel von  $90^\circ$  langsam aufeinander abgerollt werden. Kontaktnormaldruck und Schlupf werden dabei an einer Zwischenzylinderstellung ausgewertet, etwa nach einer Umdrehung um  $45^\circ$ .

	Durchmesserverhältnis I	Durchmesserverhältnis II
Zylinderdurchmesser	$\varnothing_{\text{Drucktuch}} < \varnothing_{\text{Druckplatte}}$	$\varnothing_{\text{Drucktuch}} > \varnothing_{\text{Druckplatte}}$
Überstand Drucktuch	0 mm	0,15 mm
Überstand Druckplatte	0,15 mm	0 mm
Schmitzringdurchmesser	220 mm	
Eindrückung	0,15 mm	
Drucktücher	FSR TR, Sapphire	

**Tabelle 5.15:** Berechnungsvarianten. Die Zylinderdurchmesser beziehen sich auf den Montagezustand, ohne Berücksichtigung der Eindrückung.

### 5.7.2 Berechnungsparallelisierung

Jede Berechnungsvariante wurde auf einer 8-Prozessor-Maschine (1,9 GHz Prozessoren von Typ Power 5 der Firma IBM, geschaltet als Shared-Memory-System, Betriebssystem: AIX 5.3) des Hessischen Hochleistungsrechners (HHLR) über eine MPI-

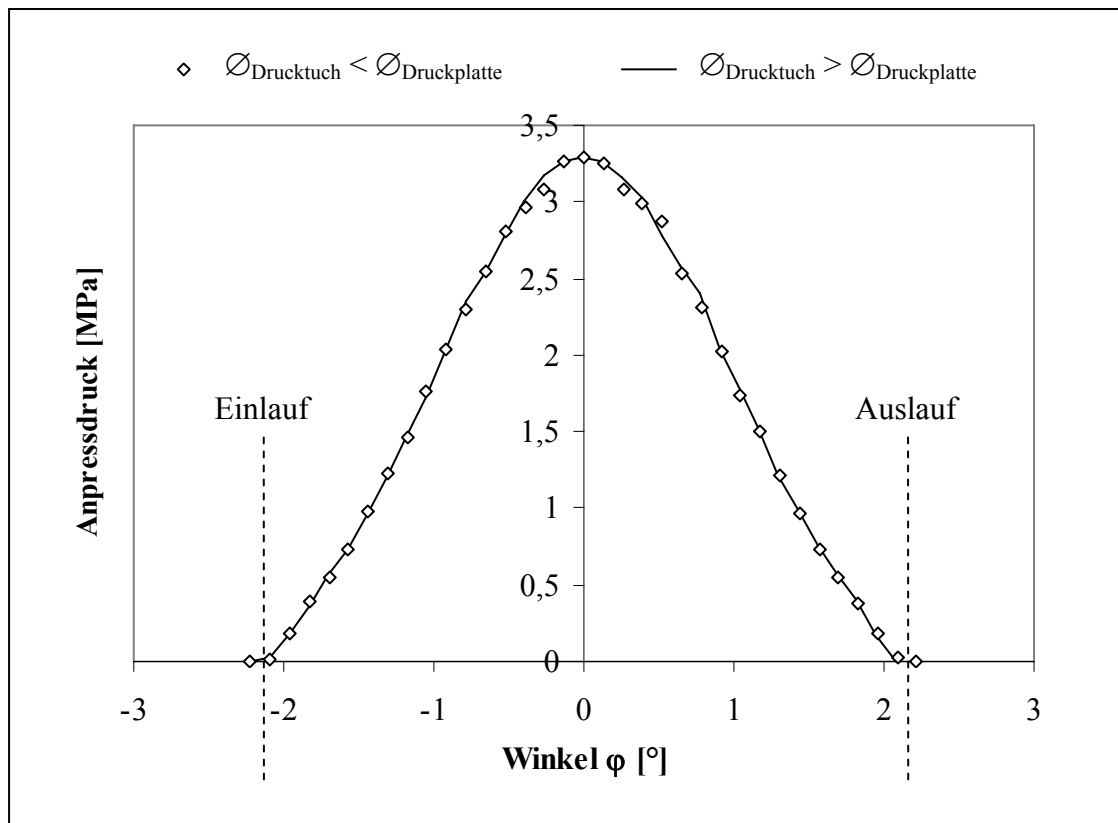


Schnittstelle parallelisiert (MPI: Message Passing Interface, siehe [SCH06]). Mit den 8 Prozessoren lässt sich mit Abaqus (Release 6.6.5) für das vorliegende, reibungsbehaftete Kontaktproblem im Vergleich zur seriellen Lösung mit einem einzigen Prozessor eine Berechnungsbeschleunigung (Speed-Up-Faktor) von etwa 4 erreichen. Zusätzliche Prozessoren würden aufgrund des zeitintensiven Datenaustauschs zwischen den einzelnen Prozessoren zu keiner weiteren Berechnungsbeschleunigung führen und die Recheneffizienz verschlechtern. Eine Berechnungsvariante besteht aus rund 150 000 Knoten, 80 000 Elementen und 300 000 Freiheitsgraden und lässt sich in etwa 20 Stunden berechnen. Dabei wurden die Nichtlinearitäten, aus dem Kontakt, der finiten Zylinderrotation, den großen Schlupfwegen sowie dem schaumelastischen Materialmodell herrührend, hauptsächlich anhand des Newton-Raphson-Iterationsverfahrens behandelt. Zur Lösung der im Laufe der einzelnen Iterationen vorkommenden linearen Gleichungssysteme wurde außerdem der direkte Solver eingesetzt [ABQ06].

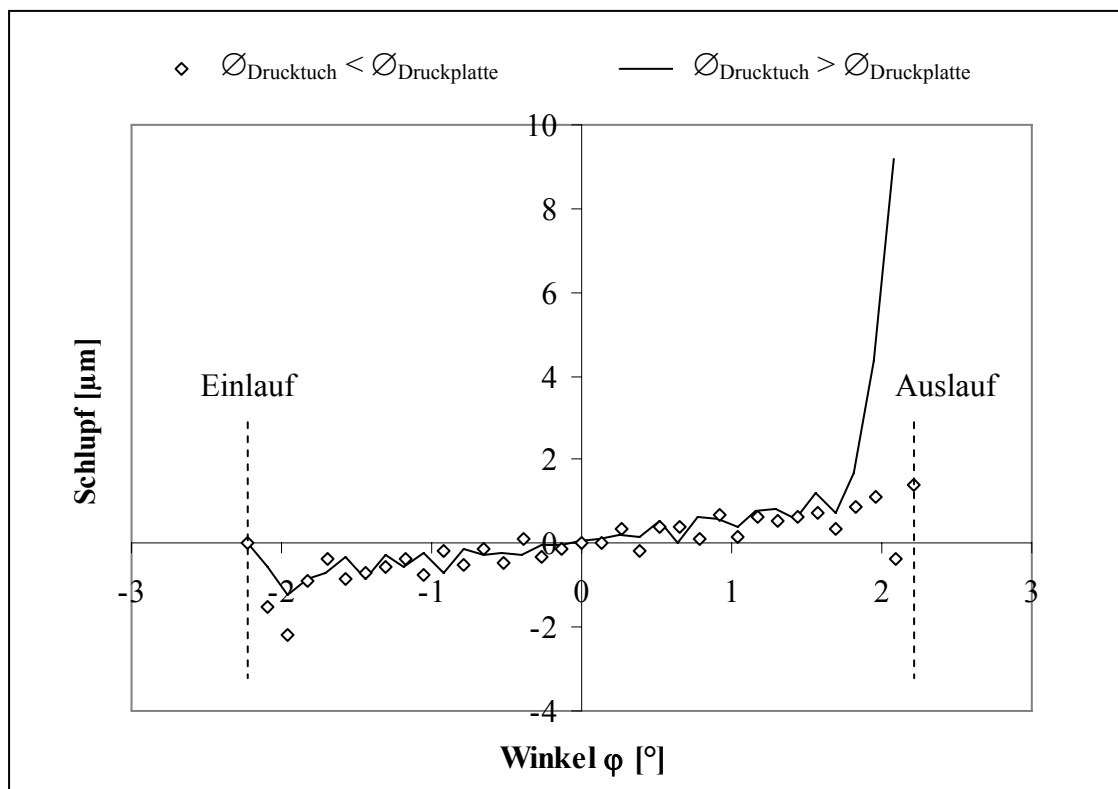
### 5.7.3 Einfluss des Durchmesserverhältnisses

Der berechnete Anpressdruck in der Berührzone ist symmetrisch, hat einen parabolischen Verlauf und erreicht sein Maximum bei  $\varphi = 0$ , wie dies in Abbildung 5.22 am Beispiel des Drucktuchs Sapphire gezeigt ist. Dabei liefern die Durchmesserverhältnisse I und II den gleichen Anpressdruck, da die Eindrückung bei beiden gleich ist (0,15 mm). Die Länge der Berührzone (Bereich mit nicht verschwindendem Anpressdruck) beträgt für beide Durchmesserverhältnisse etwa  $4^\circ$  bzw. (durch Multiplizieren mit dem Zylinderradius) 8 mm.

In Abbildung 5.23 ist der simulierte Schlupf dargestellt, der sich am Beispiel des Drucktuchs Sapphire in der Berührzone für unterschiedliche Durchmesserverhältnisse einstellt. An der Stelle, an der Drucktuch- und Druckplattenoberfläche beim Abrollen aneinander haften ist der Schlupf null. Müssen nun beide Oberflächen aneinander vorbei gleiten, so kann das Drucktuch der Druckplatte vor- (positiver Schlupf) oder nacheilen (negativer Schlupf). Bei der Übertragung eines Rasterpunkts von der Druckplatte auf das Drucktuch würde sich der Schlupfweg betragsmäßig zur Soll-Rasterpunktlänge addieren und sorgt dadurch für eine längliche (elliptische) Rasterpunktform.



**Abbildung 5.22:** Einfluss des Durchmesserhältnisses auf den Anpressdruck in der Berührzone am Beispiel des Drucktuchs Sapphire.



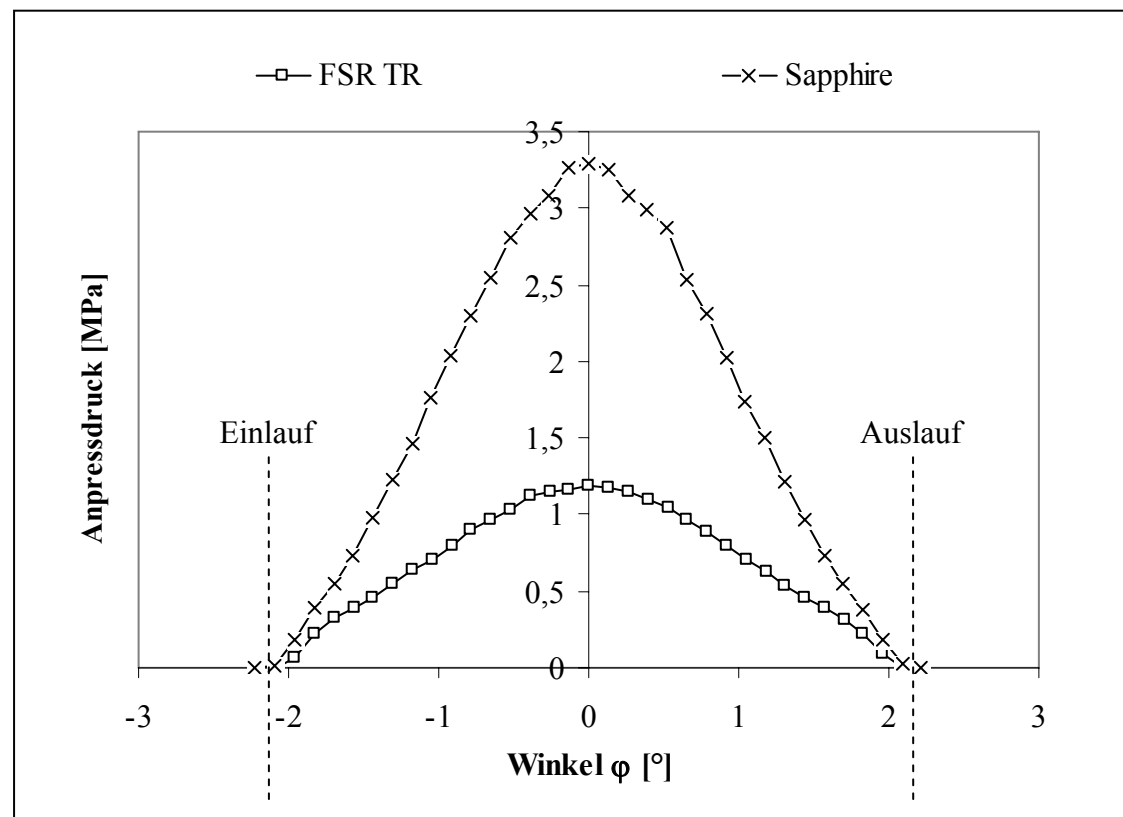
**Abbildung 5.23:** Einfluss des Durchmesserhältnisses auf den Schlupf in der Berührzone am Beispiel des Drucktuchs Sapphire.

Für beide Durchmesserhältnisse treten die größeren Schlupfwege am Ein- und Auslauf auf. Letzte können in dieser Hinsicht als die kritischen Stellen einer Berührzone betrachtet werden kann. In der Mitte der Berührzone ( $\varphi = 0$ ) ist der Schlupf null. In der Einlaufzone ist der Schlupf negativ. Das Drucktuch neigt im Vergleich zur Druckplatte dazu, beim Abrollen zurückzubleiben. In der Auslaufzone ist der der Schlupf dagegen positiv. Das Drucktuch tendiert somit dazu, der Druckplatte vorzueilen. Beim Durchmesser Verhältnis I ( $\varnothing_{\text{Drucktuch}} < \varnothing_{\text{Druckplatte}}$ ) sind die berechneten Schlupfwege betragsmäßig kleiner als  $2 \mu\text{m}$ . Beim Durchmesser Verhältnis II ( $\varnothing_{\text{Drucktuch}} > \varnothing_{\text{Druckplatte}}$ ) erreicht der Schlupf dagegen in der Auslaufzone einen Wert von über  $8 \mu\text{m}$ .

Im Vergleich zum Drucktuch Sapphire lagen die betragsmäßig maximalen Schlupfwege beim Drucktuch FSR TR für die Durchmesser Verhältnisse I und II unter  $4 \mu\text{m}$ .

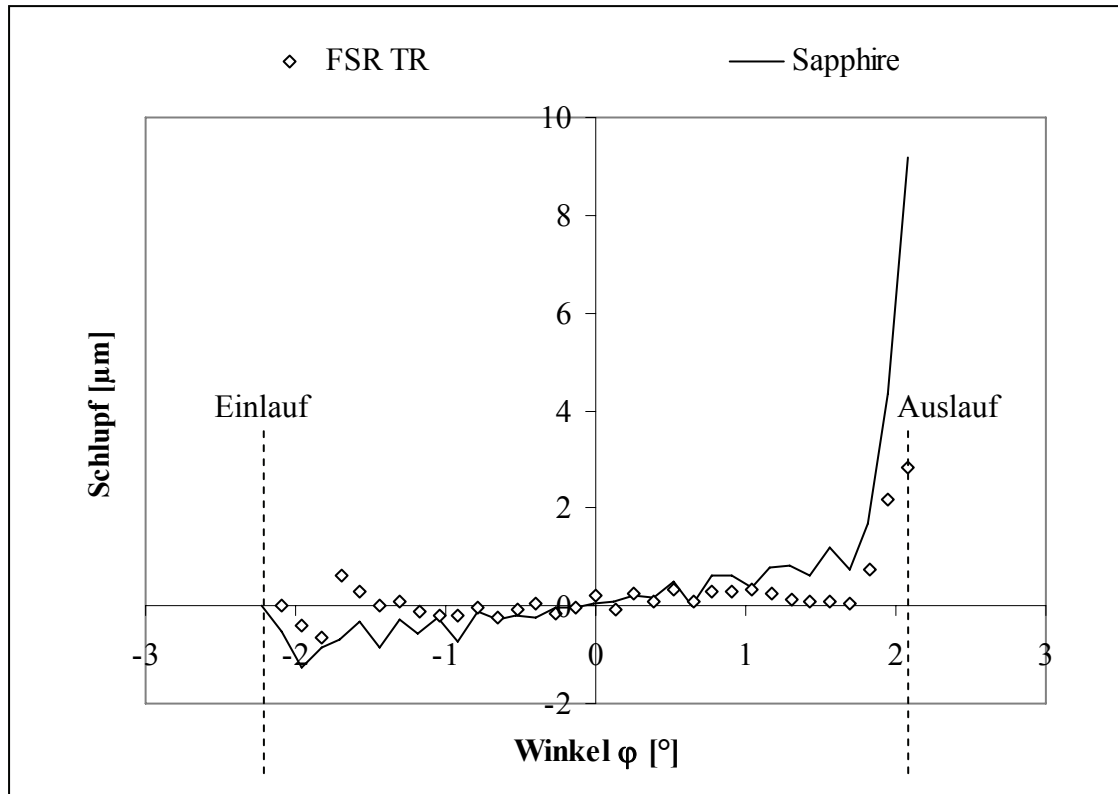
#### 5.7.4 Einfluss des Drucktuchaufbaus

Der Maximalwert des Anpressdrucks beträgt beim Drucktuch FSR TR etwa 1 MPa, Abbildung 5.24.



**Abbildung 5.24:** Einfluss des Drucktuchs auf den Anpressdruck am Beispiel des Durchmesser Verhältnisses II.

Das Drucktuch Sapphire baut einen rund dreifach höheren Anpressdruck auf, da es im Vergleich zum Drucktuch FSR TR eine dünnere Luftpolsterschicht hat, die – bei gleicher Eindrückung – eine höhere Zusammendrückung erfährt und somit eine höhere Spannung aufbaut. Die Höhe des simulierten Anpressdrucks hängt auch von der Güte der extrapolierten Federkennlinie ab (siehe Abschnitt 5.4.5.)

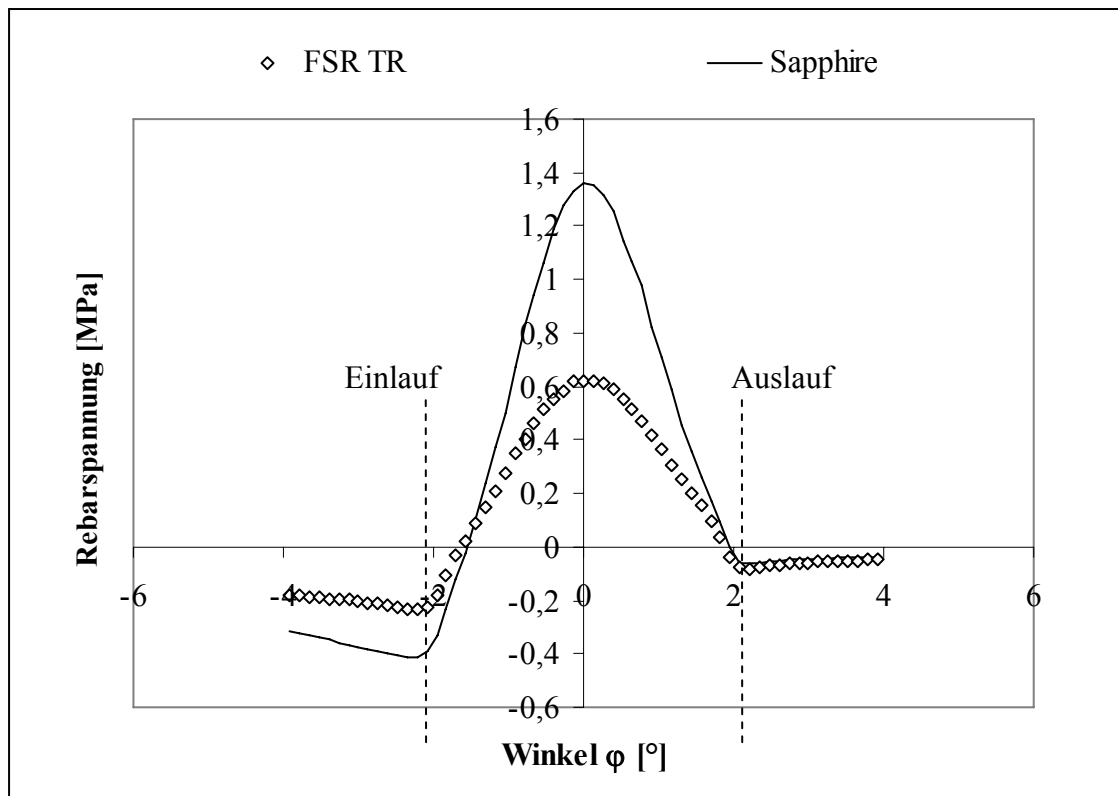


**Abbildung 5.25:** Einfluss des Drucktuchs auf den Schlupfweg am Beispiel des Durchmesserverhältnisses II.

Die Schlupfwege bei den Drucktüchern FSR TR und Sapphire sind in Abbildung 5.25 am Beispiel des Durchmesserverhältnisses II miteinander verglichen. Am Auslauf wurden für das Drucktuch Sapphire wesentlich größere Schlupfwege berechnet als für das Drucktuch FSR TR, was auf eine höhere Schiebeempfindlichkeit des Drucktuchs Sapphire hindeutet.

### 5.7.5 Spannung in der Stabilisierungsschicht (Rebar-Spannung)

Ein Vorteil des erstellten Drucktuchmodells besteht darin, die Beanspruchung der Stabilisierungsschicht berechnen zu können, die sonst experimentell nur schwer zu ermitteln ist. So ist in Abbildung 5.26 für die Drucktücher FSR TR und Sapphire am Beispiel des Durchmesserverhältnisses II die berechnete Spannung in der Stabilisierungsschicht in unmittelbarer Umgebung der Berührzone gezeigt.



**Abbildung 5.26:** Einfluss des Drucktuchs auf die Spannung in der Stabilisierungsschicht am Beispiel des Durchmesserhältnisses II.

Da die Stabilisierungsschicht bei beiden Drucktüchern unterschiedlich ist, kann anhand der Abbildung 5.26 zwar kein direkter Vergleich zwischen den Drucktüchern durchgeführt werden. Es zeigt sich jedoch ein qualitativ vergleichbarer Verlauf der Rebar-Spannung auf. Beim Versuch, in der Berührzone die Geschwindigkeiten von Drucktuch und Druckplatte durch Haften auszugleichen, entstehen in der Stabilisierungsschicht unmittelbar unterhalb des Haftgebiets eine Zugspannung, die bei  $\varphi = 0$  ihr Maximum annimmt. Am Ein- und Auslauf entstehen dagegen Druckspannungszonen (Stauzonen), wobei das Material im Einlauf- stärker staut als im Auslaufbereich. Die Simulation ergab außerdem, dass diese Stauzonen sich erst sehr weit von der Kontaktzone abbauen (bei etwa  $\varphi = \pm 30^\circ$ ).

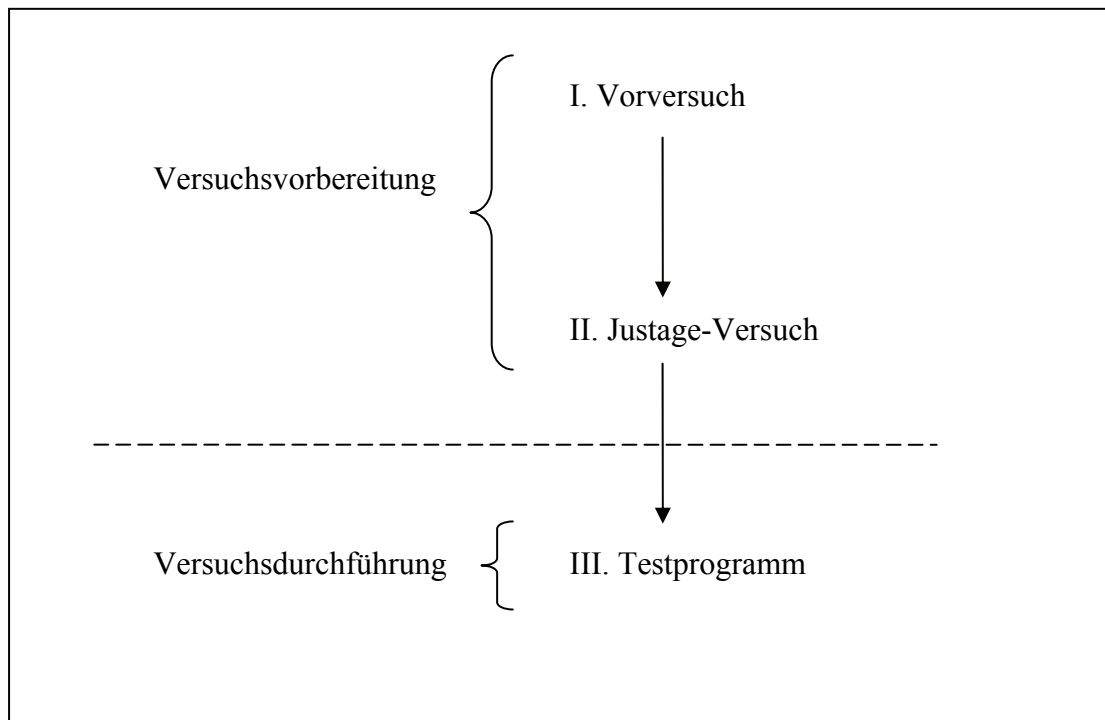
In diesem Abschnitt konnte das Rebar-Modell für unterschiedliche Drucktücher und Zylinderdurchmesser auch unterschiedliche drucktechnische Verhalten (Anpressdruck und Schlupf in der Berührzone, Schiebeneigung) simulieren. Dies soll im nächsten Abschnitt auf experimentellem Weg untersucht werden.



## 6 Experimentelle Untersuchung

### 6.1 Versuchskonzept

Die experimentelle Untersuchung der Rasterpunktverformung in Abhängigkeit des Drucktuchs und der Druckabwicklung wurde im Rahmen einer dreiphasigen Druckversuchsreihe konzipiert: Vor-, Justage-Versuch und Testprogramm, Abbildung 6.1. Die Versuchsreihe wurde an der Bogenoffset-Druckmaschine MOZ-P im Technikum des Fachgebiets Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt durchgeführt.



**Abbildung 6.1:** Versuchskonzept mit Versuchsvorbereitung und -durchführung.

#### 6.1.1 Vorversuch

Ziel des Vorversuchs ist, den Ablauf eines Druckvorgangs grob abzutesten. Die Rollen der an den Versuch beteiligten Personen werden geübt. Die zum Drucken erforderlichen Stoffe und Werkzeuge, die für die wichtigen Arbeitsschritte benötigte Zeit und der Aufwand zum Einstellen maßgebender Prozessparameter werden festgestellt. Die eventuell mit der Durchführung der Versuchsreihe verbundenen Probleme sollen frühzeitig identifiziert werden, sodass für Hilfemaßnahmen gesorgt und der Versuchsplan gegebenenfalls angepasst werden kann. Es durfte bei diesem Versuchsabschnitt von den eigentlichen Versuchsmaterialien abgewichen werden. So wurden ein gebrauchtes Drucktuch, eine Druckfarbe aus vorangegangenen Druckaufträgen und ein

typisches Bilderdruckpapier eingesetzt. Genaue Messungen zur Einstellung der Druckmaschine und Steuerung des Druckprozesses wurden nicht vorgenommen.

### **6.1.2 Justage-Versuch**

In dieser Phase wird die Druckmaschine gründlich eingerichtet. Ein Alkoholmessgerät (Alkoprint 3000 der Firma Unisensor), das eine genaue Regulierung des Alkoholgehalts im Feuchtwasser ermöglicht, wurde in den Feuchtwasserkreislauf der Druckmaschine eingebaut. Die Druckwerkszylinder wurden gründlich gereinigt und die An-, Ausleger und Greiferbrücken mechanisch fein justiert. Lage und Anpressdruck der Feucht- und Farbwalzen wurden entsprechend der Maschinendokumentation unter Zuhilfenahme von Justierstreifen mechanisch justiert (Hard-Justage). Anhand einer Justage-Druckplatte der Firma Heidelberger Druckmaschinen (siehe Abbildung 11.6 im Anhang) wurde anschließend nachgeprüft, ob Feucht- und Farbwerk ordentlich justiert sind (Soft-Justage). Anschließend wurde die Druckplatte, mit der der eigentliche Druckversuch durchgeführt werden soll, in die Druckmaschine eingesetzt und das Farbdichteprofil im Hinblick auf gleichmäßige Farbdichte Verteilung über die Bogenbreite angepasst. Dabei wurde die Farbdichte Verteilung densitometrisch am gedruckten Bogen festgestellt. Danach wurden Feucht- und Farbwerkeinstellungen nicht mehr verstellt. Typische Werte für Maschineneinstellungen sind im Abschnitt 11.5 im Anhang aufgelistet.

### **6.1.3 Testprogramm**

Das Testprogramm wurde auf mehrere Versuchsabschnitte aufgeteilt, mit denen der Einfluss wesentlicher Parameter auf die Rasterpunktverbreiterung bei optimal eingestellter Druckmaschine aufgezeigt werden soll.

## **6.2 Versuchsraum**

### **6.2.1 Versuchsparameter**

Im Testprogramm wurde der Einfluss folgender Parameter (Einflussgrößen) auf die Rasterpunktverbreiterung (Zielgröße) untersucht:

1. Drucktuchaufbau,
2. Druckabwicklung, insbesondere Umfangsverhältnis zwischen Drucktuch und Druckplatte,
3. Druckzylinderbeistellung,



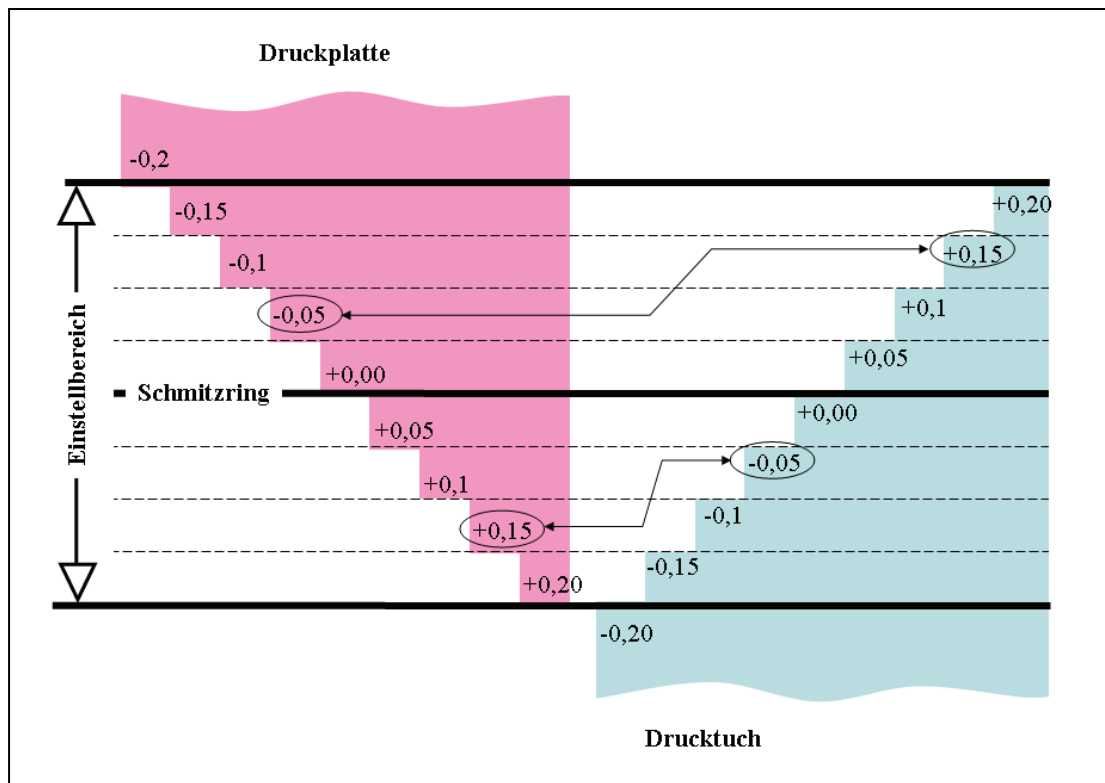
4. Druckgeschwindigkeit.
5. Drucktuchoberfläche,
6. Farbdichte bzw. Farbschichtdicke sowie
7. Papierlaufrichtung.

Für die Einflussfaktoren 3 bis 7 konnten im Rahmen dieser Arbeit keine Rechenmodelle erstellt werden. Die Versuchsergebnisse dazu werden trotzdem dargestellt.

Eine definierte Parameterkombination bildet eine Versuchsvariante und wird im Rahmen eines Einzelversuchs ausgeführt. Die Gesamtheit aller Versuchsvarianten bildet einen Versuchsraum und bestimmt den Versuchsumfang bzw. -aufwand (zur Terminologie siehe statistische Versuchsplanung, z. B. in [KLE06]). Die Umfangslänge eines Zylinders bezieht sich in den folgenden Ausführungen auf die Zylinderoberfläche im Montagezustand ohne Berücksichtigung der Eindrückung, soweit es nicht ausdrücklich auf einen anderen Zustand Bezug genommen wird. Die bei der Abrollung sich tatsächlich einstellende Zylinderumfangslänge ist erst durch Berücksichtigung der Eindrückung und der Materialbeschaffenheit der Zylinderoberflächen möglich.

### 6.2.2 V-Diagramm

Die Visualisierung der Abwickelverhältnisse zwischen Druckplatte, Drucktuch und Bogen, z. B. anhand eines Diagramms, ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Festlegung der Versuchsvarianten. Dieses soll denkbare, physikalisch sinnvolle und maschinen-technisch zugelassene Varianten aufzeigen und voneinander abgrenzen können. Werden Druckplatten- und -tuchhöhen in verschiedenen Abstufungen dargestellt, so können die daraus resultierenden Eindrückungen elementar ermittelt werden, wie dies oft in der Druckpraxis zum Gebrauch kommt, Abbildung 6.2. Diese Darstellung (das V-Diagramm) lässt jedoch nur schwer erkennen, wie Eindrückung und Umfangsverhältnis zusammenhängen und Veränderungen in der Druckplatten-Drucktuch-Abwicklung sich bedruckstoffseitig auswirken. Durch eine alternative Darstellung (das Trapez-Diagramm) soll im Folgenden eine konsistente Darstellung der Abwickelverhältnisse sowohl druckplatten- als auch bedruckstoffseitig erzielt werden.



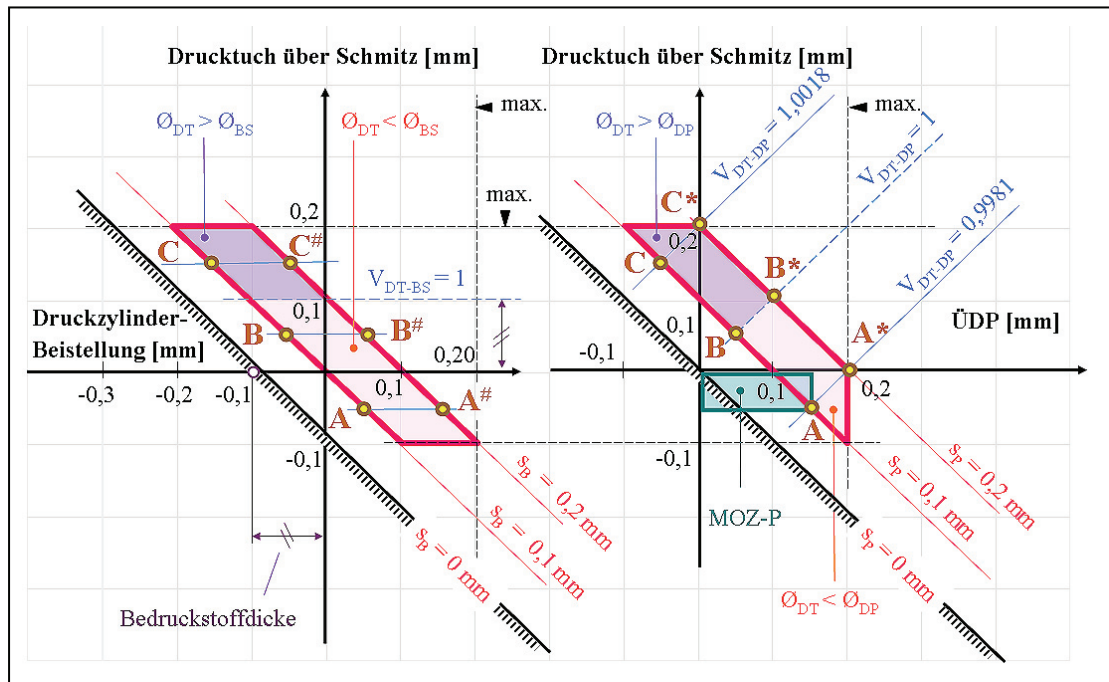
**Abbildung 6.2:** Das V-Diagramm. Die mittlere horizontale Linie steht für Schmitzringhöhe. Die Höhen von Druckplatte und -tuch sind in 0,05 mm Schritten aufgetragen. Die eingekreisten Wertepaare liefern die gleiche Eindrückung, jedoch unterschiedliche Zylinderumfangsverhältnisse.

### 6.2.3 Trapez-Diagramm für Schmitzringläufer

Im Trapez-Diagramm werden druckplatten- bzw. bedruckstoffseitige Abrollverhältnisse zuerst in ein eigenständiges Diagramm abgebildet und erst dann miteinander verknüpft. Es entstehen das rechte und linke Trapez-Diagramm, Abbildung 6.3. Diese ebene Darstellung ist von den bereits beschriebenen Abwicklungskennlinien her bekannt (siehe Abschnitt 3.6.1) und wurde entsprechend den Anforderungen der vorliegenden Arbeit angepasst.

Im rechten Trapez-Diagramm ist die Drucktuchhöhe als Funktion der Druckplattenhöhe aufgetragen. Die resultierende Eindrückung  $s_p$  der Druckplatte in das Drucktuch folgt aus der linearen Gl. 2.9 als Schar von unter dem Winkel  $-45^\circ$  parallel verlaufenden Geraden. Dargestellt sind insbesondere die Geraden  $s_p = 0,1$  mm und  $s_p = 0,2$  mm. Unter dem Winkel  $+45^\circ$  verläuft eine Schar paralleler Geraden gleicher Oberflächenlängenverhältnisse  $V_{DT-DP} = \varnothing_{DT}/\varnothing_{DP}$ , insbesondere die Gerade  $V_{DT-DP} = 1$  durch den Koordinatenursprung, bei der Druckplatte und Drucktuch gleich hoch sitzen. Links der

Graden  $V_{DT-DP} = 1$  ist der Drucktuchdurchmesser größer, rechts davon kleiner als der der Druckplatte.



**Abbildung 6.3:** Das Trapez-Diagramm mit rechtem (druckplattenseitigem) und linkem (bedruckstoffseitigem) Teil.

Die durch die Achsen  $\ddot{U}_{DP}$  und  $\ddot{U}_{DT}$  gespannte Ebene ist der Bereich denkbarer Werte für Druckplattenhöhe  $\ddot{U}_{DP}$  und Drucktuchhöhe  $\ddot{U}_{DT}$ . Physikalisch sinnvoll sind jedoch nur Paare  $(\ddot{U}_{DP}, \ddot{U}_{DT})$ , bei denen es zu einer Eindrückung kommt. Dies ist der Bereich rechts von der Geraden  $s_p = 0$  mm. Um hohe Zylinderlagerkräfte im Druckwerk zu vermeiden, werden die Eindrückungen auf höchstens  $s_p = 0,2$  mm und die Druckplatten- bzw. -tuchhöhen auf maximal  $\ddot{U}_{DP} = 0,2$  mm bzw.  $\ddot{U}_{DT} = 0,2$  mm beschränkt, woraus der maschinentechnisch zugelassene Bereich unterhalb der Geraden  $\ddot{U}_{DT} = 0,2$  mm bzw. links der Geraden  $\ddot{U}_{DP} = 0,2$  mm resultiert. Außerdem wird im Hinblick auf gute Farbübertragung von Druckplatte zu Drucktuch eine Mindesteindrückung von 0,1 mm gefordert. Die Geraden  $s_p = 0,1$  mm,  $s_p = 0,2$  mm,  $\ddot{U}_{DP} = 0,2$  mm sowie  $\ddot{U}_{DT} = 0,2$  mm grenzen einen trapezförmigen Bereich ein – den Versuchsraum, aus dem nun die Versuchsvarianten ausgewählt werden können. Aus dem rechten Trapez-Diagramm folgen für Druckplatten- und -tuchhöhe unmittelbar die Grenzwerte

$$\left. \begin{aligned} -0,1 \text{ mm} < \ddot{U}_{DP} < +0,2 \text{ mm} \\ -0,1 \text{ mm} < \ddot{U}_{DT} < +0,2 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Der von dem Druckmaschinenhersteller empfohlene Bereich wurde auf dem rechten Trapez-Diagramm als Rechteck (MOZ-P) mit den Bedingungen

$$\left. \begin{array}{l} 0 \text{ mm} < \ddot{U}_{DP} < +0,15 \text{ mm} \\ -0,15 \text{ mm} < \ddot{U}_{DT} < 0 \text{ mm} \end{array} \right\} \quad (6.2)$$

dargestellt und deckt damit nur einen kleinen Bereich des Versuchsraums ab [HDM85].

Das linke Trapez-Diagramm stellt die Drucktuchhöhe in Abhängigkeit der Druckzylinderbeistellung  $\Delta$  und sieht etwas anders aus als das rechte Trapez-Diagramm, da die Bogenhöhe ausschließlich über die Bogendicke festgelegt ist und maschinentechnisch nicht angepasst werden kann, etwa durch Unterlegen, wie dies bei der Druckplatte der Fall ist. Außerdem besitzt der Gummizylinder im Gegensatz zu seiner starren Anbindung zum Plattenzylinder über Schmitzringe zusätzlich einen radialen Freiheitsgrad  $\Delta$  (Druckzylinderbeistellung) in Richtung Druckzylinder hin. Die Linien gleicher Drucktuch-Bogen-Eindrückung ( $s_B = \text{const.}$ ) verlaufen wiederum unter  $-45^\circ$ -Winkel, Linien gleichen Umfangslängenverhältnisses von Gummi- und Druckzylinder ( $V_{DT-BS} = \text{const.}$ ) stehen jedoch diesmal waagerecht. Oberhalb bzw. unterhalb der Geraden  $V_{DT-BS} = 1$  hat der Gummizylinder einen größeren bzw. kleineren Durchmesser als der Bedruckstoff.

Rechtes und linkes Trapez-Diagramm haben die Drucktuchhöhe als gemeinsame Achse, da das Drucktuch das Bindeglied zwischen Druckplatte und Bogen ist, sodass von dem einen zum anderen Diagramm durch waagerechtes Projizieren übergegangen werden kann. Daher ist die Begrenzung der Drucktuchhöhe für beide Diagramme gleich (Gl. 6.1). Die Druckzylinderbeistellung  $\Delta$  begrenzt sich durch die Zylinderkonstruktion auf einen Wertebereich von  $-0,6 \text{ mm}$  (Gummizylinder wegrücken) bis  $+0,2 \text{ mm}$  (Gummizylinder näher anstellen). Die Geraden  $s_B = 0,1 \text{ mm}$ ,  $s_B = 0,2 \text{ mm}$ ,  $\ddot{U}_{DP} = 0,2 \text{ mm}$  sowie  $\ddot{U}_{DT} = 0,2 \text{ mm}$  grenzen wiederum einen trapezförmigen Bereich ein, der den Raum zur Auswahl der Drucktuchhöhe und Druckzylinderbeistellung je nach gewünschter Eindrückung zwischen Bogen und Drucktuch festlegt.

Das Trapez-Diagramm fasst mit seinem rechten und linken Teil alle maschinentechnisch zugelassenen Wertetripel Druckplatten-, -tuchhöhe und -zylinderbeistellung in eindeutiger Weise und unabhängig von den Werkstoffeigenschaften von Drucktuch, Druckfarbe und Bedruckstoff zusammen. Ein Tripel wird im Folgenden durch einen

Punkt X mit den Koordinaten  $\{\ddot{U}_{DP}, \ddot{U}_{DT}, \Delta\}$  gekennzeichnet. Die beiden ersten Koordinaten ergeben sich aus dem rechten, die letzte Koordinate aus dem linken Trapez-Diagramm. Die Festlegung eines Punkts X richtet sich danach, welche Eindrücke  $s_P$  und  $s_B$  sowie Umfangslängenverhältnisse  $V_{DT-DP}$  und  $V_{DT-BS}$  einzustellen sind.

Die Menge aller Punkte  $X\{\ddot{U}_{DP}, \ddot{U}_{DT}, \Delta\}$ , die in Bezug auf eine bestimmte Zielgröße (z. B. Rasterpunktlänge oder Rastertonwert) die gleiche Wirkung haben, lässt sich auf dem Trapez-Diagramm als (isoparametrische) Kennlinien darstellen, wie dies am Beispiel der Geradenschar  $s_P = \text{const.}$  bzw.  $V_{DT-DP} = \text{const.}$  gezeigt wurde. Da das Trapez-Diagramm die Abwickelverhältnisse in Bezug auf die Zylindernenndurchmesser beschreibt, ist die Kenntnis des tatsächlichen Verlaufs dieser Kennlinien erst durch Berücksichtigung der Eindrücke und der Materialeigenschaften möglich. So ist zu erwarten, dass bei einem konventionellen Drucktuch die Umfangslänge desselben durch eine Wulstbildung größer wird, was die Gerade  $V_{DT-DP} = 1$  auf dem rechten Trapez-Diagramm hinsichtlich Verlauf und Lage verändern würde.

### 6.3 Versuchsvarianten

#### 6.3.1 Abwickelverhältnisse

Auf der Basis des Trapez-Diagramms können nun für den anstehenden Druckversuch die in Tabelle 6.1 zusammengefassten Punkte definiert werden.

Punkt	Überstand Druckplatte	Überstand Drucktuch	Eindrückung Druckplatte/-tuch	Eindrückung Drucktuch/Bogen
A	0,15	-0,05	0,1	0,1
B	0,05	0,05		
C	-0,05	0,15		

**Tabelle 6.1:** Grundvarianten (Zahlenangaben in Millimeter)

Die Punkte A, B und C stellen für den Druckversuch Grundvarianten dar und weisen die gleiche Eindrücke von 0,1 mm zwischen Druckplatte und Drucktuch bei unterschiedlichen Umfangslängenverhältnissen auf, wie dies auf dem rechten Trapez-Diagramm zu erkennen ist. Durch Translation entlang der jeweiligen Geraden  $V_{GZ-DP} = \text{const.}$  lassen sich aus den Punkten A, B und C drei weitere Punkte A\*, B\* und C\* ableiten, die jedoch eine stärkere Eindrücke zwischen Druckplatte und

Drucktuch von 0,2 mm hervorrufen. Bei allen sechs Punkten wurde eine Eindrückung zwischen Drucktuch und Bogen von 0,1 mm festgelegt, sodass sich die entsprechenden Punktlagen im linken Trapez-Diagramm durch waagerechtes Projizieren auf die Gerade  $s_B = 0,1$  mm ermitteln lassen. Durch Verschieben der Grundvarianten entlang der Geraden  $s_B = 0,1$  mm resultieren drei weitere Punkte  $A^\#$ ,  $B^\#$  und  $C^\#$ , die sich von den Grundvarianten durch eine doppelte Eindrückung zwischen Drucktuch und Bogen unterscheiden.

Aus dem Trapez-Diagramm resultieren folgende Abwickeleigenschaften von Schmitz-ringläufern, würde bei den Zylinderumfangsverhältnissen nach wie vor auf die Nenn-durchmesser Bezug genommen:

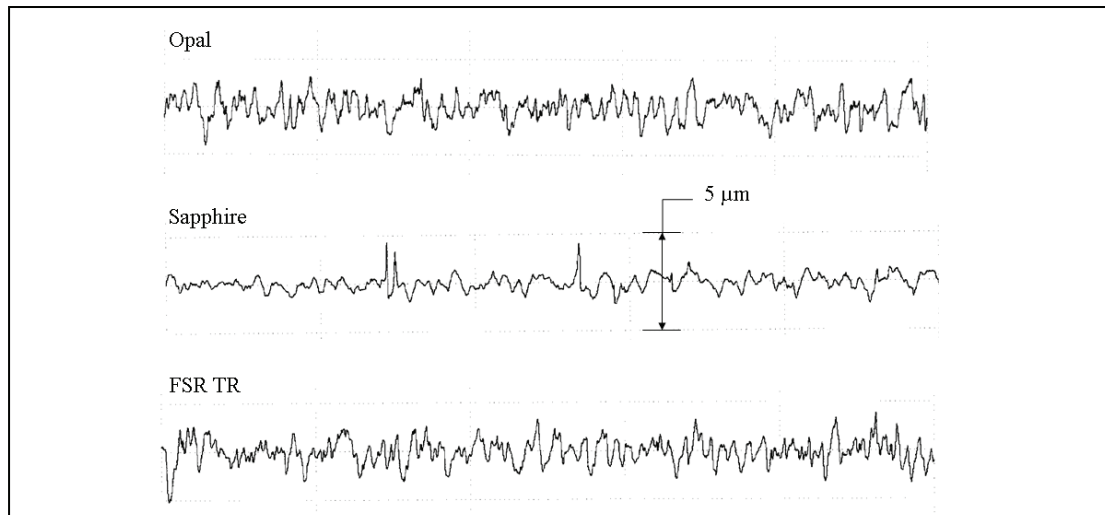
- $B^*$  ist der einzige Punkt, bei dem Platte, Drucktuch und Bogen die gleiche Umfangslänge haben (Schnittpunkt Gerade  $V_{DT-DP} = 1$  und  $V_{DT-BS} = 1$ ).
- Wird das System aus Platte, Drucktuch und Bogen mit den vier Parametern Eindrückung und Zylinderumfangsverhältnis (jeweils druckplatten- und bedruckstoffseitig) betrachtet, so werden bei einer Änderung der Druckplatten- und/oder Drucktuchhöhe mindestens zwei der vier Parameter gleichzeitig verändert. So hält z. B. der Übergang von A zu  $A^*$  zwar das Verhältnis Drucktuch- zu Plattenumfang konstant, erhöht jedoch die Eindrückung zwischen Druckplatte und Drucktuch sowie das Umfangsverhältnis Drucktuch zu Bogen.
- Wird für die Drucktuchhöhe ein maximaler Wert  $\ddot{U}_{DT,max}$  festgelegt, so ist ab einer Bedruckstoffdicke desselben Betrags ( $t_B = \ddot{U}_{DT,max}$ ) der Bogenumfang immer größer als der des Drucktuchs.

### 6.3.2 Druckgeschwindigkeit

Die Druckgeschwindigkeit wird auf 4000 B/h und 8000 B/h gesetzt und lediglich anhand der Grundvarianten untersucht.

### 6.3.3 Drucktücher

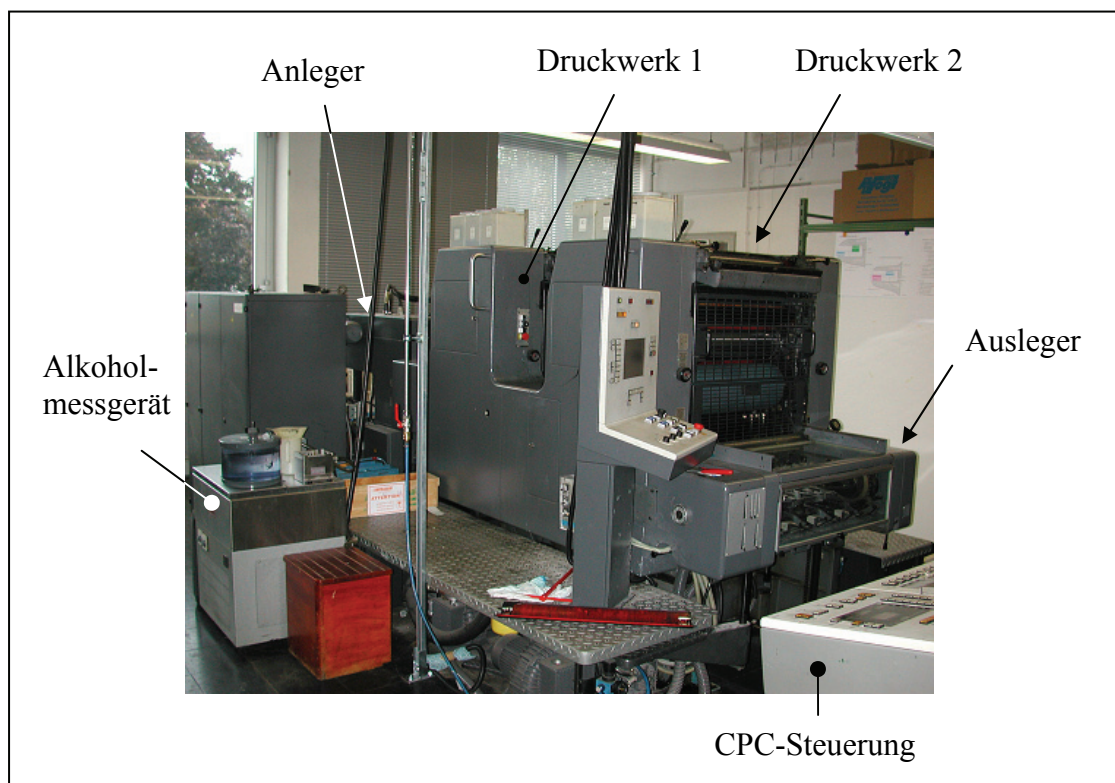
Die Versuchsdrucktücher wurden im Abschnitt 4.4 dargestellt. Zusätzlich wurden die Oberflächenprofile der Deckschicht mit einem Perthometer gemessen, Abbildung 6.4. Im Vergleich zu Drucktuch Sapphire zeigten die Drucktücher Opal und FSR TR mit  $R_z = 3 \dots 4 \mu m$  die größeren Rautiefen.



**Abbildung 6.4:** Gemessener Oberflächenprofil der Deckschicht bei den Versuchsdrucktüchern.

#### 6.4 Versuchsmaschine

Der Druckversuch wird an der Bogenoffset-Druckmaschine MOZ-P (Bogenformat 48 x 64 cm, Firma Heidelberger Druckmaschinen) durchgeführt, Abbildung 6.5. Ein Maschinenschema wurde bereits in Abbildung 2.9 dargestellt.



**Abbildung 6.5:** Versuchsmaschine.

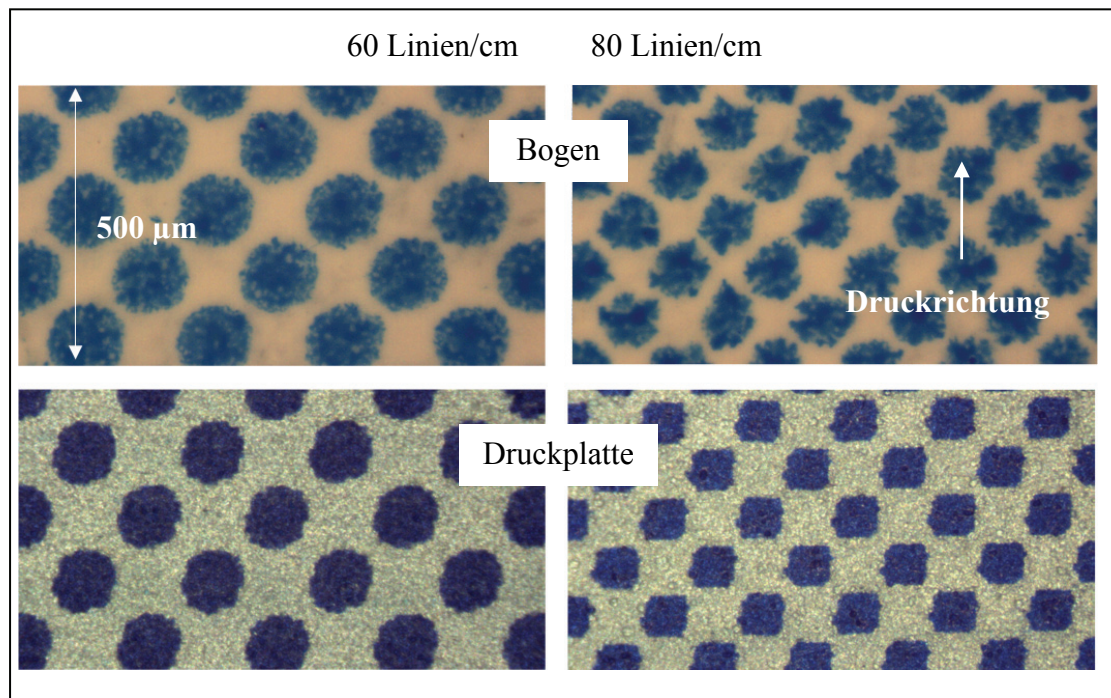


Die Maschine verfügt über zwei Druckwerke, ein Alcolor-Feuchtwerk mit nachgerüstetem Alkoholmessgerät (Alcoprint 3000, Firma Unisensor) sowie einer CPC-Steuerung, mit der sich u. a. das Farbprofil über die Bogenbreite fern einstellen lässt. Gedruckt wird einfarbig am ersten Druckwerk. Eine Regulierung der klimatischen Bedingungen war zum Zeitpunkt des Versuchs noch nicht möglich.

### 6.5 Versuchsdruckplatte

Der Druckplatte kommt eine große Bedeutung zu, insbesondere bei Druckversuchen, bei denen eine kontinuierliche, gleichmäßige Farbabnahme über die Versuchsdauer hinweg sehr wichtig ist. Es wurde auf eine Testdruckform der Firma Heidelberger Druckmaschinen zurückgegriffen, die neben verschiedenen, auf den Druckbereich verteilten Bildmotiven auch einen Druckkontrollstreifen mit einem Schiebe-/Dublierfeld sowie 40%- und 80%-Rasterfeldern beinhaltet (siehe Abbildung 11.7 im Anhang).

Bereits während der Versuchsvorbereitungsphase wurde bei der Auswahl einer für den Versuch geeigneten Testdruckform mit zwei Rasterfeinheiten (60 und 80 Linien/cm) und zwei Rasterpunktformen (rund und rautenförmig) gedruckt, Abbildung 6.6.



**Abbildung 6.6:** Auswahl von Rasterfeinheit und -punktform der Testdruckplatte. Dargestellt sind mikroskopische Aufnahmen eines 40%-Rastertonfeld auf Druckplatte und Druckbogen (Rasterwinkel 45°).



Die 60er Rasterfeinheit in Kombination mit einer runden Rasterpunktform lieferte im Hinblick auf die Rasterpunktbildung und -konturenschärfe die besseren Druckergebnisse und wurde daher für den Druckversuch übernommen.

## 6.6 Druckfarbe und Versuchspapier

Im Hinblick auf die aufwändige, lange Maschineneinstellung wurde eine robuste, außerdem schnell wegschlagende Druckfarbe (Topset-Serie Euro Cyan, Firma Epple Druckfarben) eingesetzt. Als Versuchspapier wurde mattgestrichenes Bilderdruckpapier eingesetzt (LumiArt 48 x 65 cm, 135 g/m<sup>2</sup>, Firma Stora Enso), wobei bereits bei der Herstellung auf gleich bleibende Papiereigenschaften besonders geachtet wurde. Im Versuch wurden drei Arten von Bogen unterschieden:

- Makulaturbogen: Sie dürfen mehrmals bedruckt werden und erhalten dadurch Bogenbestäubungsmittel, das sich auf Drucktuch und -platte absetzen kann. Sie werden z. B. zum Warmlaufen der Druckmaschine eingesetzt, für die Versuchsauswertung jedoch nicht.
- Vorlaufbogen: Sie werden nur einmal bedruckt und werden dann eingesetzt, wenn die Druckmaschine kurzzeitig in einen anderen Zustand versetzt werden soll (z. B. andere Druckbeistellung oder Druckgeschwindigkeit). Sie werden ebenfalls nicht ausgewertet.
- Versuchsbogen: Sie werden unmittelbar im Anschluss an den Vorlaufbogen bedruckt. Sie werden anschließend ausgewertet und repräsentieren das Druckergebnis einer bestimmten Versuchsvariante.

## 6.7 Versuchsdurchführung

Von den bisher beschriebenen Versuchsvarianten konnten im zeitlichen Versuchsrahmen die Grundvarianten A, B und C sowie die daraus abgeleiteten Varianten A<sup>#</sup>, B<sup>#</sup> und C<sup>#</sup> durchgeführt werden, nicht jedoch die Varianten A\*, B\* und C\* mit doppelter Eindrückung zwischen Druckplatte und Drucktuch, Tabelle 6.2.

Mit der Variation des Drucktuchs und der Druckgeschwindigkeit ergeben sich insgesamt 27 Versuchsvarianten, die zweckmäßig in möglichst wenige Versuchsabschnitte einzugruppieren sind. Dazu bieten sich folgende Versuchsschemen an:

- Versuchsschema I: In einem Versuchsabschnitt werden alle Versuchsvarianten mit demselben Drucktuch durchgeführt. Dieses wird erst beim Übergang von dem einen zum nächsten Versuchsabschnitt gewechselt. Dies hat den Vorteil,

dass für ein Drucktuch der Einfluss verschiedener Abwickelverhältnisse unter vergleichbaren Versuchsbedingungen vorliegt. Nachteilig ist dabei das häufige Anpassen der Druckplattenhöhe durch geeignete Unterlegbogen, was die Druckplattenqualität vermindert.

- Versuchsschema II: Für die Dauer eines Versuchsabschnitts wird die Druckplatte auf einer bestimmten Höhe gehalten. Geändert wird jedoch das Drucktuch. In einem Versuchsabschnitt kann auf dieser Weise für mehrere Drucktücher nur ein Abwickelverhältnis zwischen Druckplatte und Drucktuch untersucht werden.

Punkt	Druck- plattenhöhe [mm]	Druck- tuchhöhe [mm]	Eindrückung Druck- platte/-tuch [mm]	Eindrückung Drucktuch/ Bogen [mm]	Geschwin- digkeit [B/h]
A	0,15	-0,05	0,1	0,1	4000/8000
B	0,05	0,05			
C	-0,05	0,15			
A <sup>#</sup>	≡ A			0,2	8000
B <sup>#</sup>	≡ B				
C <sup>#</sup>	≡ C				

**Tabelle 6.2:** Zusammenfassung der durchgeführten und ausgewerteten Varianten.

Versuchsschema II reduziert die mechanische Beanspruchung der Druckplatte infolge Unterlegen und Vorspannen und wurde daher gewählt, woraus drei Versuchsabschnitte (A/A<sup>#</sup>), (B/B<sup>#</sup>) und (C/C<sup>#</sup>) resultieren. Die Variante A<sup>#</sup> konnte unmittelbar im Anschluss zu A durchgeführt werden, da dabei lediglich die Druckzylinderbeistellung angepasst werden musste. Jeder Versuchsabschnitt wurde zügig und unterbrochen nach folgendem Schema durchgeführt:

1. Mit der Testform und einem gebrauchten Drucktuch wurde die Druckmaschine bei {A, 8000 B/h} in Betrieb genommen. Dazu wurden 500 Makulaturbogen gedruckt.
2. Die Drucktuchoberfläche wurde im Montagezustand gewaschen.

3. Bei {A, 8000 B/h} wurden 100 Vorlauf-, danach 20 Versuchsbogen gedruckt. Dies stellt einen Vergleichsdruck dar, mit dem der Maschinenzustand zu Beginn des Versuchsabschnitts festgestellt werden kann.
4. Das erste Versuchsdrucktuch wurde mit einem Drehmomentschlüssel (Spannmoment: 50 Nm) gespannt.
5. Die Drucktuchhöhe wurde mit einer Messuhr festgestellt und anhand von Unterlegbogen gegebenenfalls korrigiert. Da bei der Messung die Drucktuchoberfläche durch Anliegen der Messuhr leicht zusammengedrücken lässt, lag die Messgenauigkeit bei  $\pm 0,02$  mm.
6. Nach 100 Vorlaufbogen wurde die Drucktuchoberfläche gewaschen und das Drucktuch nachgespannt.
7. Nach 100 weiteren Vorlaufbogen wurden 20 Versuchsbogen bei 8000 B/h gedruckt, zur Auswertung eindeutig gekennzeichnet und in der Druckreihenfolge durchnummeriert.
8. Von A wurde zu A<sup>#</sup> durch Anpassen der Druckzylinderbeistellung übergegangen. 50 Vorlauf- und 20 Versuchsbogen wurden gedruckt.
9. Es wurde zur Grundvariante zurückgekehrt, die Druckgeschwindigkeit von 8000 B/h auf 4000 B/h reduziert und mit 100 Vorlauf- und 20 Versuchsbogen gedruckt.
10. Das Drucktuch wurde gewechselt und die Schritte 4 bis 9 wiederholt.
11. Zum Schluss des Versuchsabschnitts wurde der Vergleichsdruck (Punkt 3) wiederholt, um den Maschinenzustand am Versuchsende festzustellen. Die Vergleichsdrucke beschreiben außerdem die Reproduzierbarkeit des einen und selben Druckvorgangs bei verschiedenen Maschinenzuständen (Versuchsanfang/-ende).
12. Punkte 1 bis 11 wurden für die weiteren beiden Versuchsabschnitte (B/B<sup>#</sup>) und (C/C<sup>#</sup>) wiederholt.

Bei den Druckversuchen wurde eine Farbdichte von 1,5 erzielt (Normalfärbung), die allerdings je nach Versuchsvariante variieren durfte. Zur Untersuchung des Farbdichteneinflusses auf die Rasterpunktverbreiterung wurden die Farbzonenschrauben an der CPC-Maschinensteuerung um 10 % weitergeöffnet bzw. zurückgedreht, sodass eine Über- bzw. Unterfärbung resultiert. Der Übergang von der einen Einfärbungsstufe zur anderen erfolgte durch Bedrucken von 200 Vorlaufbogen. Es wurde außerdem mit

Schmalbahnbogen gedruckt. Zur Ermittlung des Einflusses der Papierlaufrichtung wurden bei {A, 8000 B/h} unmittelbar nach den 20 Schmalbahnbogen weitere 20 Breitbahnbogen gedruckt.

## 7 Versuchsauswertung

### 7.1 Vorgehensweise

Die Versuchsauswertung erfolgt in zwei Schritten:

1. Auswertung des Justageversuchs. Dabei soll die Verteilung der Farbdichte über die Bogenbreite und deren Veränderung von dem einen zum nächsten Druckbogen densitometrisch festgestellt werden, woraus Hinweise über den Feucht- und Farbwerkzustand folgen. Darauf basierend sollen diejenigen Stellen auf den Druckbogen identifiziert werden, an denen das Testprogramm (Versuchsphase III) ausgewertet werden kann.
2. Auswertung des Testprogramms. Dies soll densitometrisch erfolgen, jedes Mal Volltondichte, Rastertonwert und deren Konstanz über die jeweiligen Versuchsbogen festgestellt werden soll. Darüber hinaus werden einzelne Rasterpunkte mittels Mikroskopie und Bildanalyse bemaßt und ausgewertet.

### 7.2 Auswertungskenngrößen

Densitometrisch wird die Farbdichte in Voll- und Mittelton (40%-Rasterfeld) ausgewertet, mikroskopisch die Rasterpunktlänge  $L_x$  (Längsrichtung = Druckrichtung), -breite  $L_y$  und deren Verhältnis

$$f = \frac{L_x}{L_y} \quad (\text{Formfaktor}) \quad (7.1)$$

sowie die Rasterpunktrundheit

$$\rho = \frac{\kappa_{\text{Rasterpunkt}}}{\kappa_{\text{Kreis}}} \quad (7.2)$$

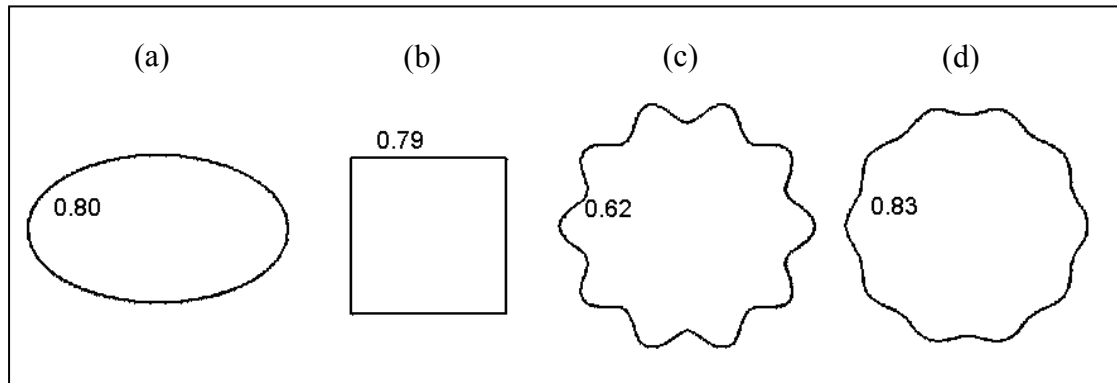
mit dem Umfangs-Flächen-Verhältnis eines Rasterpunkts bzw. eines Kreises

$$\kappa_{\text{Rasterpunkt}} = \frac{U_{\text{Rasterpunkt}}^2}{A_{\text{Rasterpunkt}}} \quad (7.3)$$

$$\kappa_{\text{Kreis}} = \frac{U_{\text{Kreis}}^2}{A_{\text{Kreis}}} = 4 \cdot \pi \quad (7.4)$$

U und A bezeichnen Umfang und Fläche eines Kreises bzw. eines Rasterpunkts. Bei der Bildung des Umfangs-Flächen-Verhältnisses  $\kappa$  wird zweckmäßig das Quadrat des Umfangs genommen, um beim Kreis die Abhängigkeit von dem Radius zu eliminieren.

Die Rasterpunktrundheit  $\rho$  ergibt sich aus dem Umfangs-Flächen-Verhältnis des Rasterpunkts bezogen auf das eines Kreises und nimmt Werte an, die umso näher 1 liegen, je runder der Rasterpunkt ist und je gleichmäßiger seine Berandung verläuft. Dieses Rundheitsmaß wird z. B. in der Software Matlab verwendet, [MAT06], und hat den Nachteil, dass es der Anschauung in manchen Fällen nicht nahe kommt. So wären nach Ermittlung der Rundheit  $\rho$  verschiedener Figuren entsprechend Abbildung 7.1 die Ellipse (a) mit  $\rho = 0,8$  und das Quadrat (b) mit  $\rho = 0,79$  etwa „gleich rund“.



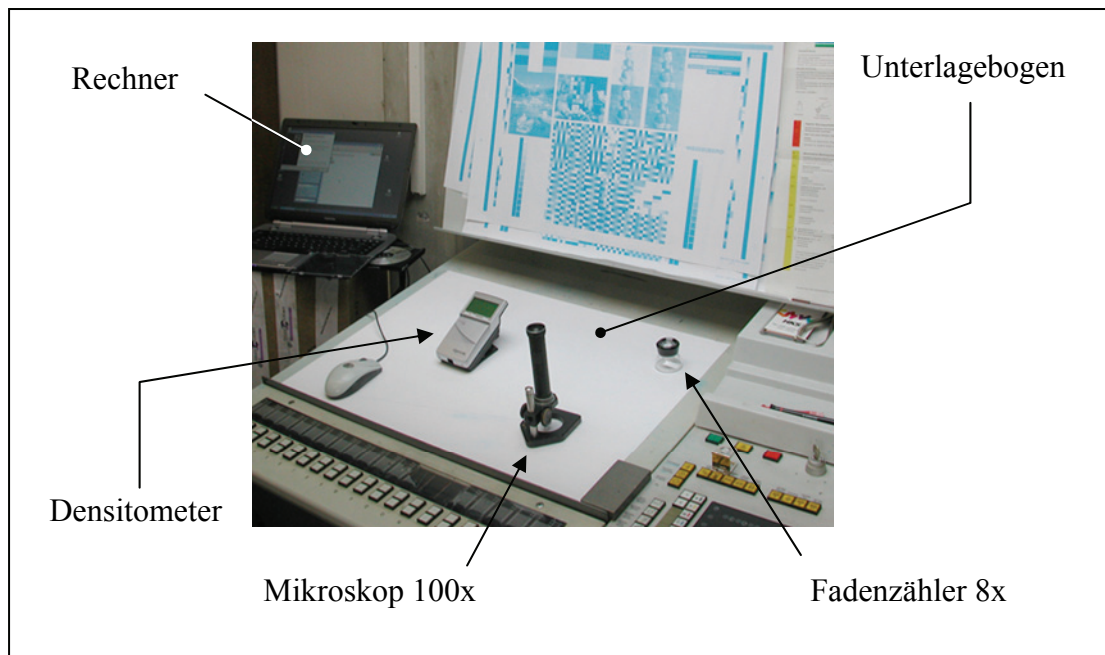
**Abbildung 7.1:** Rundheit  $\rho$  verschiedener Figuren, berechnet mit der Image Processing Toolbox der Software Matlab.

Außerdem zeigt der Punkt (c) zwar insgesamt eine runde Form, die sich in einen Kreis als umhüllende Kurve enthalten lässt, die Punktrundheit ( $\rho = 0,62$ ) würde jedoch aufgrund der sternförmigen Berandung schlechter beurteilt als die der Ellipse ( $\rho = 0,8$ ). Die Tatsache, dass eine Glättung der Punktberandung die Punktrundheit verbessert, wie dies durch Vergleich der Punkte (c) und (d) hervorgeht, gibt das Rundheitsmaß  $\rho$  plausibel wieder.

### 7.3 Densitometrische Versuchsauswertung

#### 7.3.1 Messeinrichtung

Zur densitometrischen Messung wurden drei unbedruckte Versuchsbogen als Unterlage verwendet, Abbildung 7.2. Die auszuwertenden Versuchsbogen wurden auf die Unterlagebogen gelegt und anhand eines Reflexionsdensitometers (VIPDENS C9, Firma FAG Graphic Systems SA) an den interessierenden Stellen ausgemessen. Die Messwerte wurden in einem Rechner tabellarisch erfasst. Eine Lupe und ein Mikroskop (100fache Vergrößerung) wurden begleitend zur Messungen eingesetzt, um bei Bedarf das Raster lokal zu sichten.



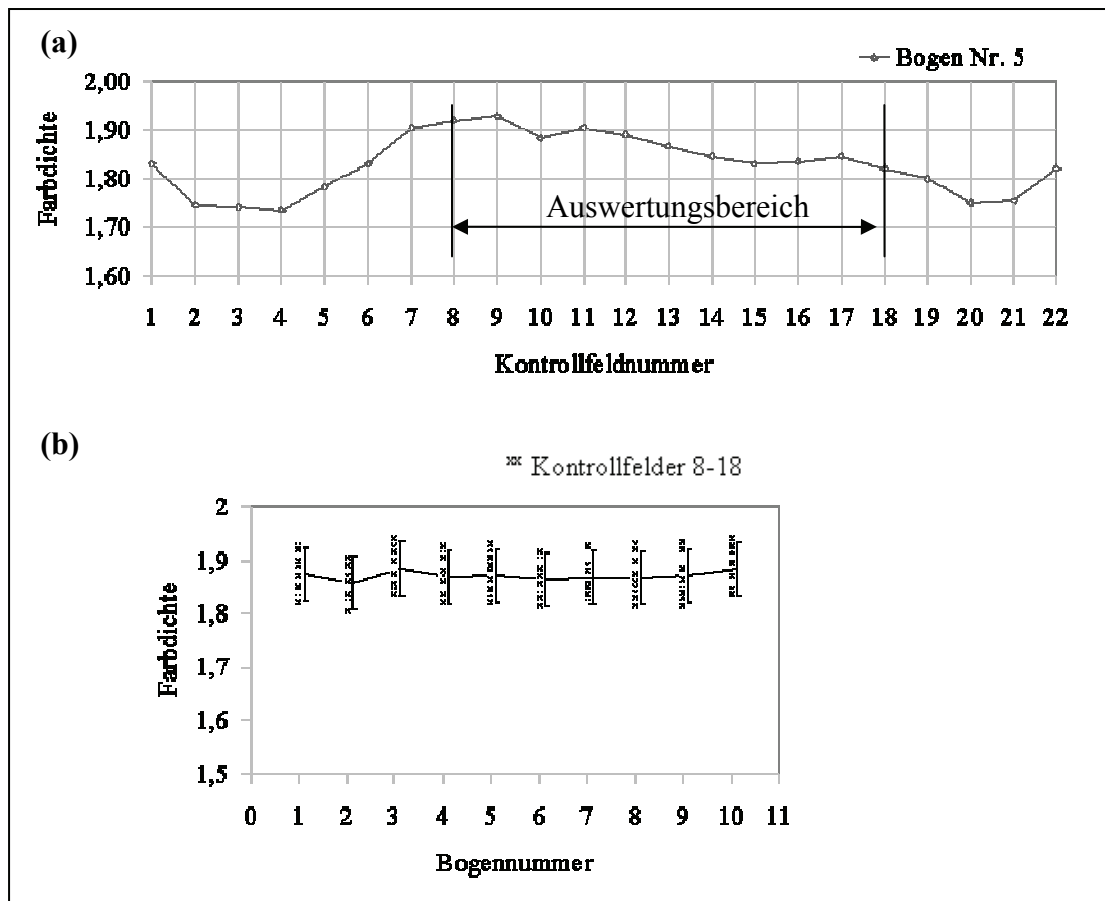
**Abbildung 7.2:** Messeinrichtung

### 7.3.2 Feucht- und Farbwerk-Justage

Im Hinblick auf justierte Feucht- und Farbwerke werden folgende Bedingungen gestellt:

1. Bei gleich geöffneten Farbzonenschrauben soll sich über die Breite des Druckbogens eine konstante Farbdichte einstellen.
2. Die Farbdichte soll sich an einer bestimmten Stelle von dem einen zum nächsten Druckexemplar nicht um mehr als 0,1 unterscheiden.

Die Messung der Farbdichte über die Bogenbreite wurde am Druckkontrollstreifen durchgeführt und zeigte, dass trotz vorher mechanisch justierter Feucht- und Farbwalzen das Farbdichteprofil nicht konstant verläuft sondern einen muldenartigen Verlauf in Richtung Bogenränder hin aufweist, Abbildung 7.3a. In den Randbereichen wurde daher bei den anschließenden Druckversuchen nicht ausgewertet. Zur Überprüfung der Bedingung 2 wurden die Farbdichtewerte in den mittleren Kontrollfeldern (8 bis 18) für 10 aufeinander folgende Druckbogen gemessen. Abbildung 7.3b zeigt, dass die Dichtewerte innerhalb einer Spannweite (= Maximum - Minimum) von 0,1 um einen Mittelwert liegen, sodass Bedingung 2 als eingehalten betrachtet werden kann.



**Abbildung 7.3:** Farbdichte- und Farbdichteschwankungsdiagramme. (a) Farbdichte-Verteilung über die Bogenbreite, gemessen an den von links nach rechts nummerierten Kontrollfeldern. (b) Farbdichteschwankung bei den mittleren Kontrollfeldern 8-18 über mehrere Druckexemplare hinweg. Die durchgezogene Linie zeigt den Mittelwert an, die senkrechten Kurzbalken die Spannweite von 0,1.

### 7.3.3 Auswertungsstellen

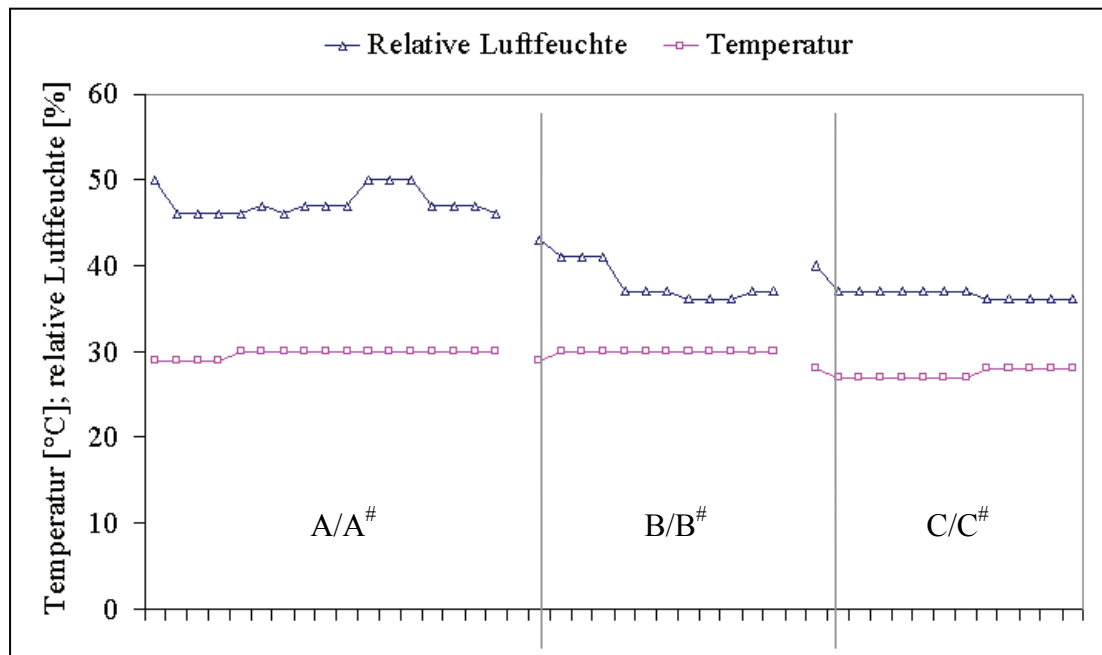
Auf Basis der Ergebnisse der Feucht- und Farbwerkjustage wurden zum Auswerten der Vollton- und Rasterflächen im Druckversuch zwei Stellen festgelegt: das auf dem Druckkontrollstreifen mittig angeordnete Vollflächenfeld 10 sowie das unmittelbar neben ihm sitzende 40%-Rasterfeld (siehe Abbildung 7.3.)

### 7.3.4 Klimatische Bedingungen

Die klimatischen Bedingungen während der drei Versuchsabschnitte sind in Abbildung 7.4 dargestellt. Die Temperatur lag überall bei  $29 \pm 2$  °C. Größere Schwankungen ergaben sich bei der relativen Luftfeuchte. Sie lag für die drei Versuchsabschnitte durchschnittlich zwischen 36 % und 48 %, woraus eine Spannweite von 12 % resultiert. Die Schwankung für den einen und selben Versuchsabschnitt lag



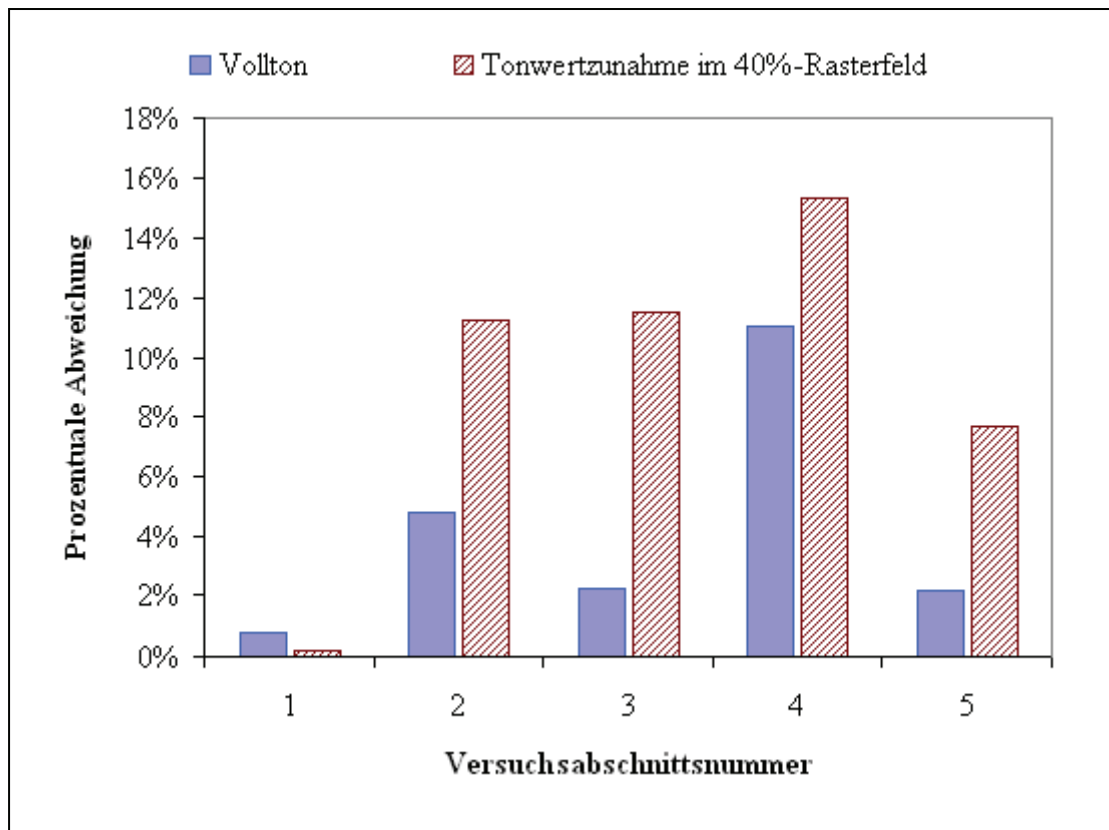
allerdings innerhalb einer geringeren Spannweite von 5 %, sodass Vergleiche von Rasterpunktgröße und -form bei Drucktüchern innerhalb desselben Versuchsabschnitts zuverlässiger sind als Vergleiche zwischen verschiedenen Versuchsabschnitten.



**Abbildung 7.4:** Klimatische Bedingungen für die Dauer der Versuchsabschnitte. Die einzelnen Punkte der Kurven stehen für die Versuchsvarianten.

### 7.3.5 Vergleichsdruck

Im Laufe der Versuchsreihe, und vielfach während der Versuchsvorbereitungsphasen I und II, wurde der Vergleichsdruck mehrmals wiederholt, jeweils am Anfang und Ende eines Versuchsabschnitts, und die Farbdichte sowie die Rastertonwertzunahme im 40%-Raster an den bereits festgelegten Auswertungsstellen gemessen, Abbildung 7.5. Alle Vergleichsdrucke wurden bei gleicher Druckabwicklung {A, 8000 B/h}, gleicher Maschineneinstellung und mit demselben Drucktuch gedruckt. Änderungen ergaben sich dabei lediglich aus den klimatischen Bedingungen sowie dem notwendigen Austausch der Druckplatte und einem Nachspannen der Feuchtwalzen infolge auftretender Maschinenstörung. Zwecks übersichtlicher Darstellung werden Farbdichte und Tonwertzunahme am Ende eines Versuchsabschnitts immer auf die jeweiligen Werte am Anfang desselben bezogen. Am Anfang des Versuchsabschnitts sind Farbdichte und Tonwertzunahme in Abbildung 7.5 nicht dargestellt und betragen stets 100 %. Dargestellt sind nur die darauf bezogenen, prozentualen Abweichungen am Ende des Versuchsabschnitts.



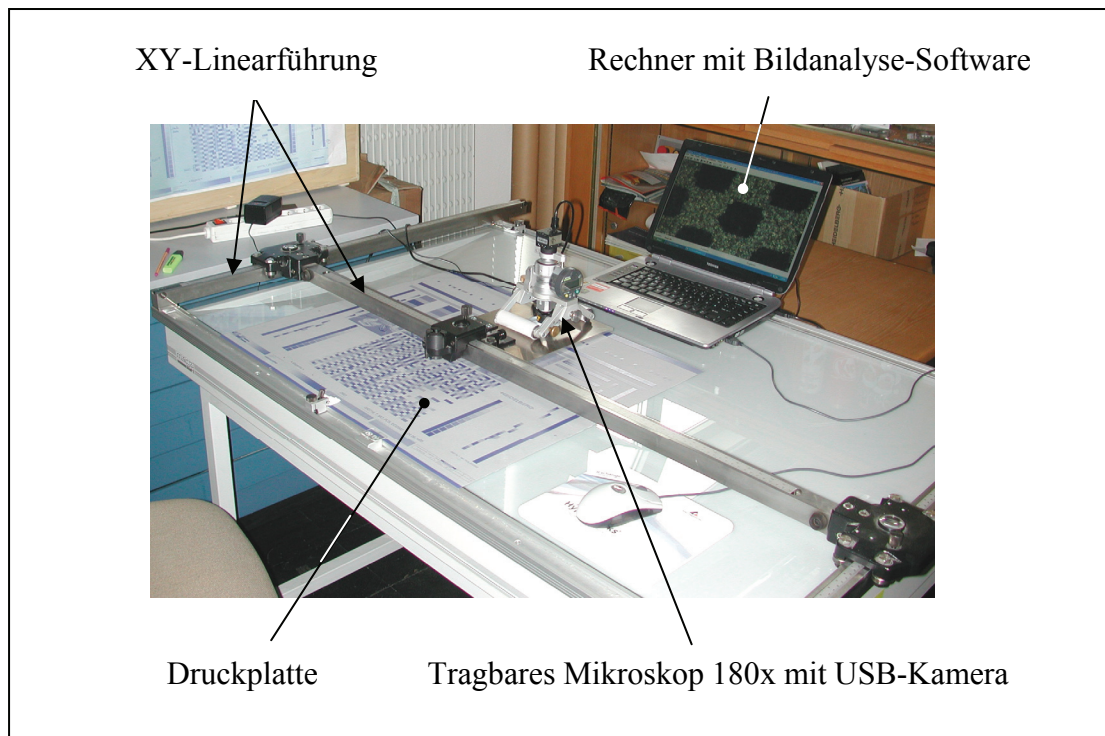
**Abbildung 7.5:** Prozentuale Abweichung der Farbdichte und Tonwertzunahme im Mittelton am Ende verschiedener Versuchsabschnitte, bezogen auf die Werte am Anfang des jeweiligen Versuchsabschnitts.

Bei den fünf ausgewerteten und in Abbildung 7.5 dargestellten Versuchsabschnitten lagen Farbdichte und Tonwertzunahme am Ende eines Versuchsabschnitts tiefer als an dessen Anfang. Der größte Unterschied zwischen Abschnittsanfang und -ende lag prozentual in der Farbdichte bei 11 %, in der Tonwertzunahme bei 15 %. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei einem Versuchsabschnitt, bei dem dieselbe Druckplatte, engere klimatische Schwankungen und feste Feucht- und Farbwerkeinstellungen eingehalten werden, die Reproduzierbarkeit der Druckergebnisse besser ausfällt.

## 7.4 Mikroskopische Versuchsauswertung

### 7.4.1 Messeinrichtung

Zur mikroskopischen Aufnahme einzelner Rasterpunkte wurde ein tragbares Mikroskop (CellCheck, M-Service & Geräte) mit 180facher Vergrößerung eingesetzt, das auf einem Positioniertisch mit XY-Linearführung manuell geführt werden kann, Abbildung 7.6.



**Abbildung 7.6:** Messeinrichtung zur mikroskopischen Rasterpunktauswertung.

Versuchsbogen und Druckplatte wurden auf den Positioniertisch gelegt und am 40%-Rasterfeld berührungslos mikroskopiert, sodass die Anfertigung von Bogenausschnitten entfällt. Das Mikroskop ist mit einer USB-Kamera ausgestattet, die die Aufnahmen einem Rechner mit Bildanalyse-Software (Metrik, M-Service & Geräte) übermittelt und dort abspeichert (TIFF-Format). Um bei den Messungen zu einer statistischen Aussage zu gelangen und außerdem den Aufwand der Bogenpositionierung zu reduzieren, wurden alle zu einer bestimmten Versuchsvariante zugeordneten Versuchsbogen zwar immer auf dem gleichen Rasterfeld, jedoch an voneinander geringfügig abweichenden Stellen desselben mikroskopiert.

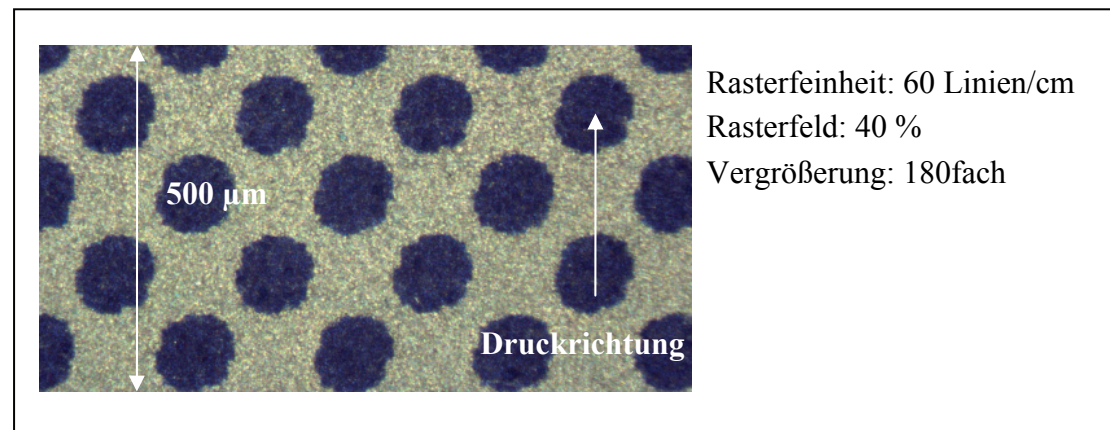
#### 7.4.2 Bildanalyse und Rasterpunktvermessung

Eine mikroskopische Aufnahme ließ etwa 10 volle Rasterpunkte erkennen. Aus den 20 Versuchsbogen einer Versuchsvariante resultierten 200 auszuwertende Rasterpunkte, die nicht manuell ausgemessen werden konnten. Vielmehr wurde mithilfe der Software Matlab eine Auswertungsprozedur erstellt, die den Bemaßungsvorgang automatisierte. Aus den Eingangsdaten (TIFF-Bilder zu den einzelnen Versuchsbogen) wurden dabei Rasterpunktlänge, -breite, Formfaktor, Rundheit sowie Flächendeckung berechnet, über 20 Versuchsbogen gemittelt und tabellarisch ausgegeben. Zugehöriger

Algorithmus und Quellcode sind im Anhang 11.8 angegeben. Die über 20 Versuchsbogen gemittelten Auswertungskenngrößen werden im Folgenden mit dem Index „20“ versehen.

#### 7.4.3 Mikroskopieren auf der Druckplatte

Die in Abbildung 7.7 gezeigte Rasterpunktaufnahme wurde auf der plan liegenden Druckplatte mikroskopiert, bevor diese in der Druckmaschine erstmalig eingesetzt wurde. Die mittlere Rasterpunktlänge bzw. -breite beträgt  $L_{x20} = 121,4 \mu\text{m} \pm 1,5 \%$  bzw.  $L_{y20} = 121,1 \mu\text{m} \pm 1,7 \%$ , die mittlere Rasterpunktrundheit  $\rho_{20} = 0,63 \pm 3,5 \%$  und die mittlere Flächendeckung  $\phi_{20} = 39,0 \% \pm 1,3 \%$ . Die statistischen Werte wurden auf der Basis von 5 Messungen an verschiedenen Stellen des 40%-Rasterfelds ermittelt.



**Abbildung 7.7:** Mikroskopische Aufnahme der Rasterpunkte auf der Druckplatte.

#### 7.4.4 Mikroskopieren auf den Bogen

Die Schwankung einer Auswertungskenngröße innerhalb einer Versuchsvariante konnte durch die statistische Auswertung von jeweils 20 Versuchsbogen festgestellt werden. In Tabelle 7.1 sind Werte für die Schwankung im Druckergebnis am Beispiel des Drucktuchs FSR TR bei der Versuchsvariante {A, 8000 B/h} zusammengefasst. Zum Vergleich sind ebenfalls die bereits für die Druckplatte aufgeführten Werte angegeben. Anhand der Tabellenwerte ist gut zu erkennen, dass die Rasterpunktlänge, -breite und -rundheit deutlich größere Schwankungen im Druck aufweisen als auf der Druckplatte (um etwa den Faktor 3). Unterschiede in den Schwankungen der Flächendeckung zwischen Druckplatte und Bogen sind jedoch geringer (Faktor 1,3). Die Schwankungen in Rasterpunktlänge, -breite, -rundheit und Flächendeckung können als Qualitätsmerkmale des Druckprozesses aufgefasst werden und hängen vor

allem von der Druckmaschine, der Qualität von Druckplatte, Drucktuch und Bedruckstoff sowie der Qualität von Einfärbung und Feuchtung ab.

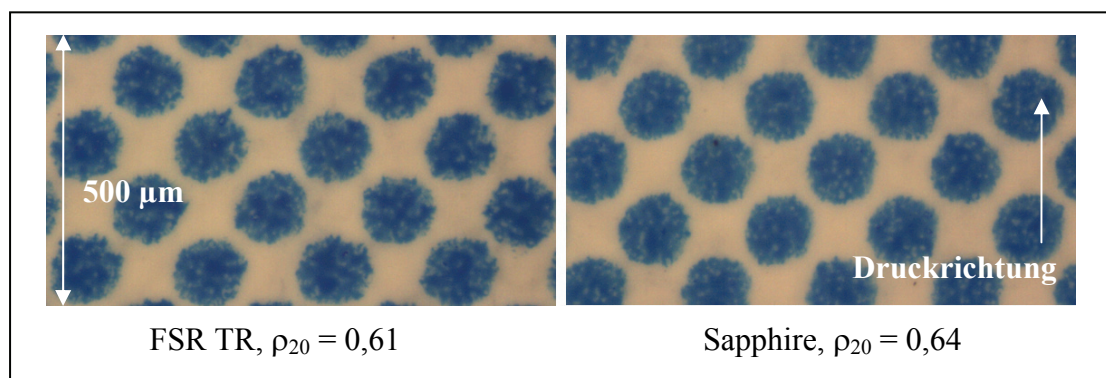
	Rasterpunkt- länge	Rasterpunkt- breite	Rundheit	Flächen- deckung
Druckplatte	121,4 $\mu\text{m}$ $\pm 1,5 \%$	121,1 $\mu\text{m}$ $\pm 1,7 \%$	$\rho_{20} = 0,63$ $\pm 3,5 \%$	39,0 % $\pm 1,3 \%$
Bogen	135,1 $\mu\text{m}$ $\pm 5 \%$	139,5 $\mu\text{m}$ $\pm 4,5 \%$	$\rho_{20} = 0,61$ $\pm 7,0 \%$	48,4 % $\pm 1,6 \%$

**Tabelle 7.1:** Statistische Rasterpunktauswertung auf Druckplatte und Bogen. Angegeben sind Mittelwert und Standardabweichung aus 20 hintereinander folgenden Versuchsbogen bzw. aus 5 Messungen an verschiedenen Stellen des 40%-Rasterfelds bei der Druckplatte.

Statistische Werte wurden ebenfalls für die densitometrisch erfassten Farbdichte und Tonwertzunahme ermittelt. So ergaben sich am Beispiel des Drucktuchs FSR TR bei der Versuchsvariante {A, 8000 B/h} im Vollton eine Farbdichte von  $1,5 \pm 0,8 \%$  und im 40%-Rasterfeld ein Rastertonwert von  $60 \% \pm 3,8 \%$ .

#### 7.4.5 Einfluss der Drucktuchoberfläche

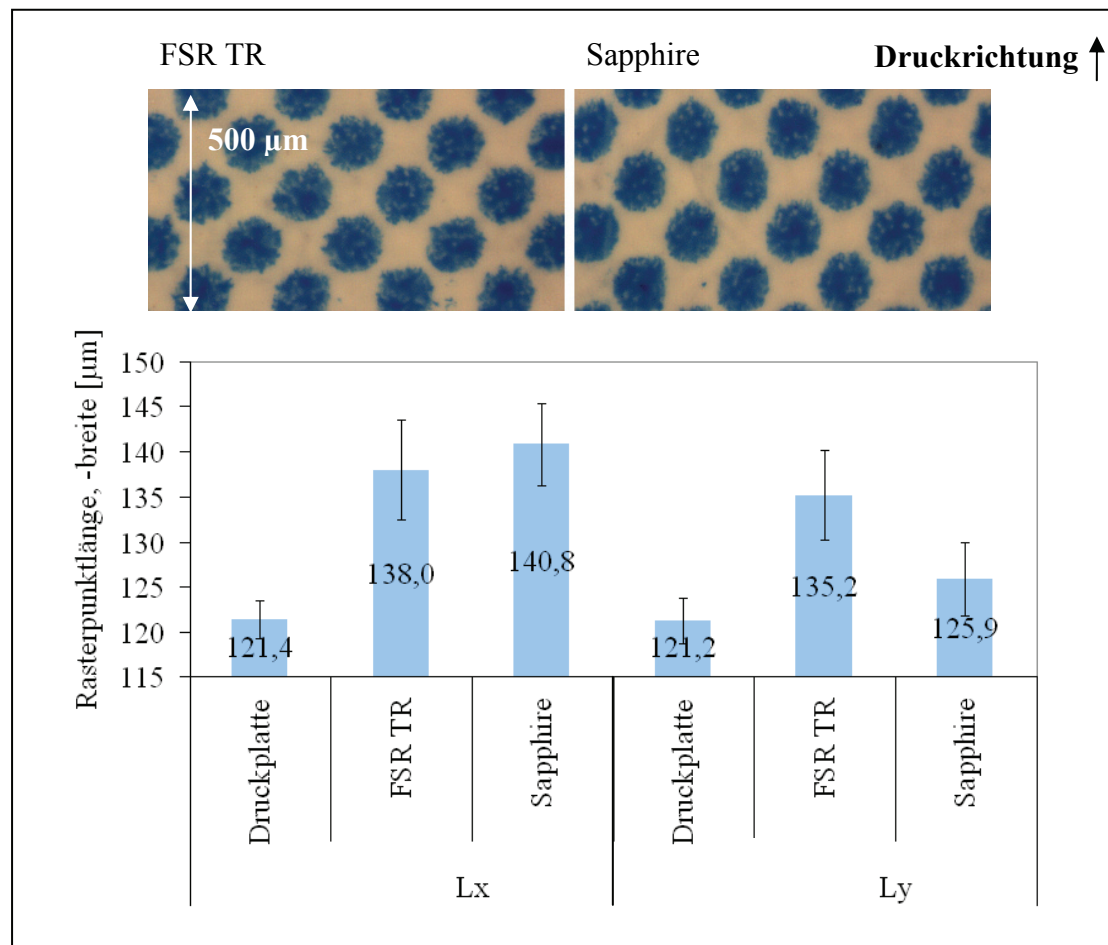
Bei der Versuchsvariante {A, 8000 B/h} wies das Drucktuch Sapphire wegen der glatteren Oberfläche eine gleichmäßigere Rasterpunktberandung als das Drucktuch FSR TR auf, die zu einer insgesamt etwas besseren Punktrundheit geführt hat ( $\rho_{20} = 0,64$  im Vergleich zu 0,61), Abbildung 7.8.



**Abbildung 7.8:** Einfluss der Drucktuchoberfläche auf Rasterpunktberandung. Beide Raster wurden bei {A, 8000 B/h} gedruckt und auf dem Bogen ausgewertet.

### 7.4.6 Einfluss des Drucktuchaufbaus

Der Einfluss des Drucktuchs auf die Rasterpunktverbreiterung wird am Beispiel der Versuchsvariante {C, 8000 B/h} dargestellt, bei der die Druckplatte einen kleineren Nenndurchmesser hat als das Drucktuch, Abbildung 7.9. Beim Drucktuch FSR TR sind die Rasterpunkte überwiegend in die Breite ausgerichtet, beim Drucktuch Sapphire dagegen in die Länge. Das Drucktuch Opal wurde wegen starken Schiebens nicht ausgewertet. Der Unterschied in Rasterpunktlänge und -breite zwischen den Drucktöchern FSR TR und Sapphire beträgt  $2,8 \mu\text{m}$  bzw.  $9,3 \mu\text{m}$ .



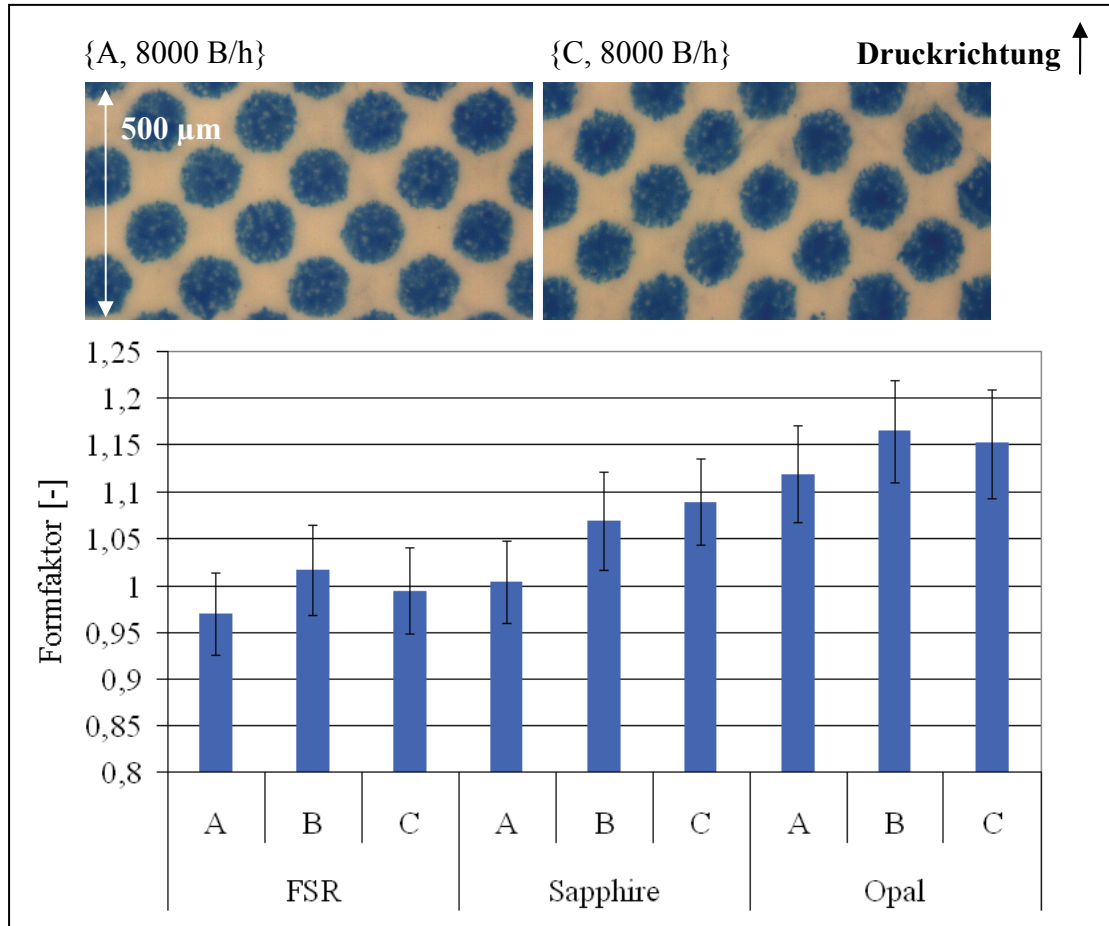
**Abbildung 7.9:** Einfluss des Drucktuchaufbaus auf Rasterpunktverbreiterung. Gedruckt wurde bei {C, 8000 B/h}. Angegeben sind die aus 20 Bogen (ca. 200 Rasterpunkten) ermittelten Mittelwerte der Rasterpunktlänge und -breite. Die Standardabweichung beträgt bei den Drucktöchern absolut etwa  $5 \mu\text{m}$ , bei der Druckplatte  $2,5 \mu\text{m}$ .

### 7.4.7 Einfluss der Abwickelverhältnisse

Der Einfluss der Abwickelverhältnisse auf die Rasterpunktverbreiterung ließ sich durch Betrachtung desselben Drucktuchs bei den Druckabwicklungen A, B und C und



z. B. 8000 B/h ermitteln. Wegen der höheren Schwankungen in den klimatischen Bedingungen zwischen verschiedenen Versuchsabschnitten wurde bei diesem Einflussfaktor nicht die absolute Rasterpunktlänge und -breite sondern der Formfaktor als relatives Maß zugrunde gelegt, Abbildung 7.10.

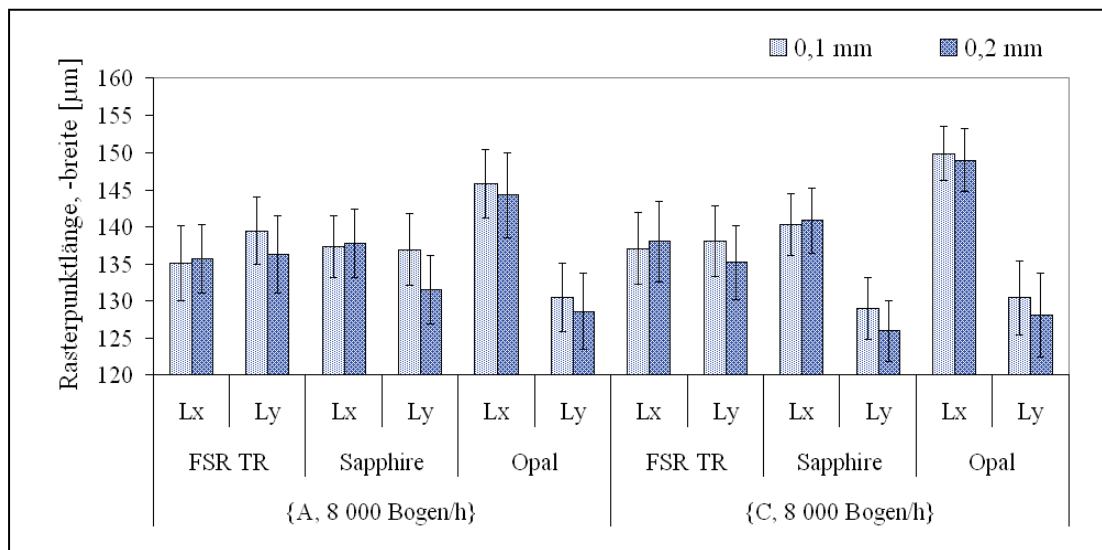


**Abbildung 7.10:** Einfluss der Druckabwicklung auf die Rasterpunktverbreiterung. Oben sind am Beispiel des Drucktuchs Sapphire mikroskopische Rasterpunktaufnahmen bei den Druckabwicklungen A und C dargestellt.

Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten am Beispiel des Drucktuchs Sapphire, dass die Rasterpunkte in Druckrichtung bei {C, 8000 B/h} insgesamt mehr verzogen liegen als bei {A, 8000 B/h}. Erst eine statistische Auswertung aller 20 Versuchsbogen gibt endgültig die Tendenz des Formfaktors. Das Drucktuch Sapphire reagiert auf Erhöhung des Verhältnisses von Drucktuch- und Druckplattenumfangslänge (Übergang von A nach C) durch einen monoton steigenden Formfaktor. Dagegen zeigt das Drucktuch FSR TR eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Umfangslängenverhältnis. Beim Drucktuch Opal wurden die Qualität von Rasterpunktform und -berandung bei den Druckabwicklungen B und C durch Schiebepuren stark vermindert.

### 7.4.8 Einfluss der Druckzylinderbeistellung

Der Einfluss der Eindrückung zwischen Drucktuch und Bogen ließ sich durch Vergleich der Versuchsvarianten A und A<sup>#</sup> bzw. C und C<sup>#</sup> bei 8000 B/h untersuchen, Abbildung 7.11. Sowohl bei der Druckabwicklung A als auch C ergab sich bei Erhöhung der Druckzylinderbeistellung eine Abnahme der Rasterpunktweite. So schrumpfte der Rasterpunkt beim Drucktuch Sapphire durch Verdoppelung der Eindrückung zwischen Drucktuch und Bogen (Übergang von A zu A<sup>#</sup>) um 4,1 % zusammen. Die Rasterpunktlänge zeigt dagegen eine geringere Veränderung auf.



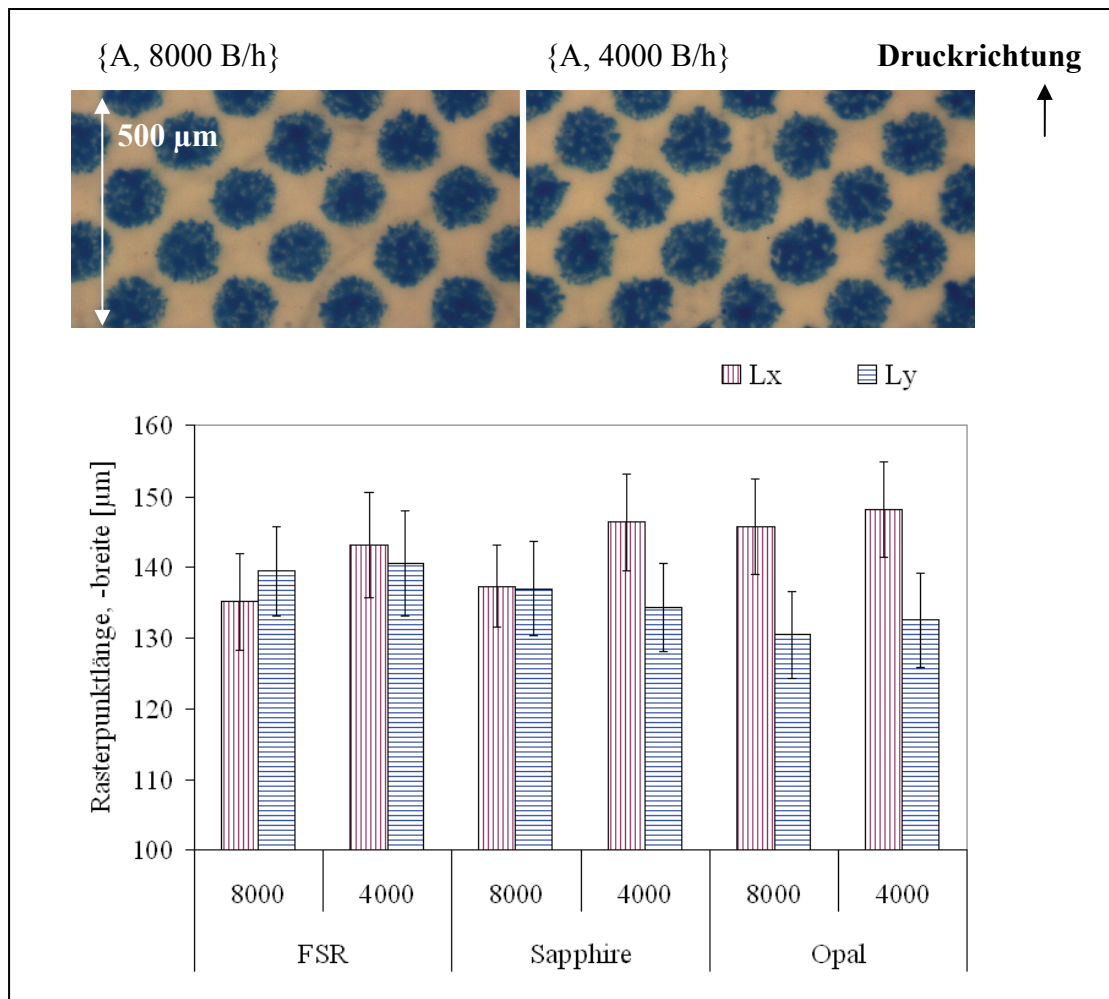
**Abbildung 7.11:** Einfluss der Druckzylinderbeistellung auf die Rasterpunktverbreiterung. Dargestellt sind Rasterpunktlänge und -breite für verschiedene Drucktücher, Druckabwicklungen und Drucktuch-Papier-Eindrückungen.

### 7.4.9 Einfluss der Druckgeschwindigkeit

Die Ermittlung der Rasterpunktangaben bei zwei verschiedenen Druckgeschwindigkeiten zeigte, dass durch Halbierung der Druckgeschwindigkeit die Rasterpunkte bei den Luftpolsterdrucktüchern in Druckrichtung länger werden, und zwar um 5,9 % beim Drucktuch FSR TR und 6,6 % beim Drucktuch Sapphire, Abbildung 7.12.

Eine Veränderung in der Rasterpunktweite fiel deutlich geringer aus als bei der Rasterpunktlänge. Beim konventionellen Drucktuch zeichnete sich in den Rasterpunktangaben keine große Veränderung ab.



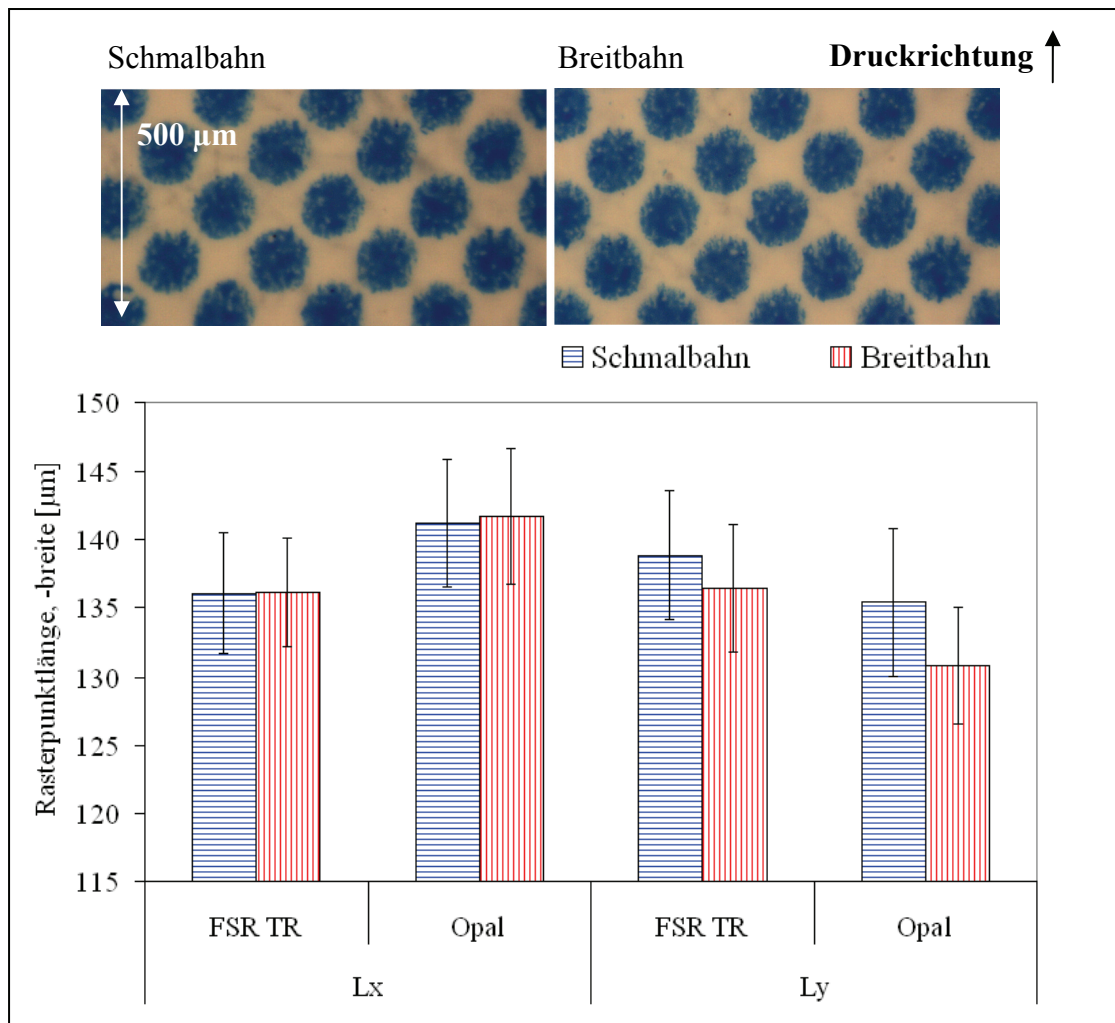


**Abbildung 7.12:** Einfluss der Druckgeschwindigkeit auf die Rasterpunktverbreiterung. Oben sind am Beispiel des Drucktuchs FSR TR mikroskopische Rasterpunktaufnahmen bei den Druckgeschwindigkeiten 8000 und 4000 B/h dargestellt.

#### 7.4.10 Einfluss der Papierlaufrichtung

Wie aus der Abbildung 7.13 hervorgeht, reagiert die Rasterpunktweite empfindlicher auf die Papierlaufrichtung als auf die Rasterpunktlänge und ist außerdem beim Drucktuch Opal stärker ausgeprägt als beim Drucktuch FSR TR.

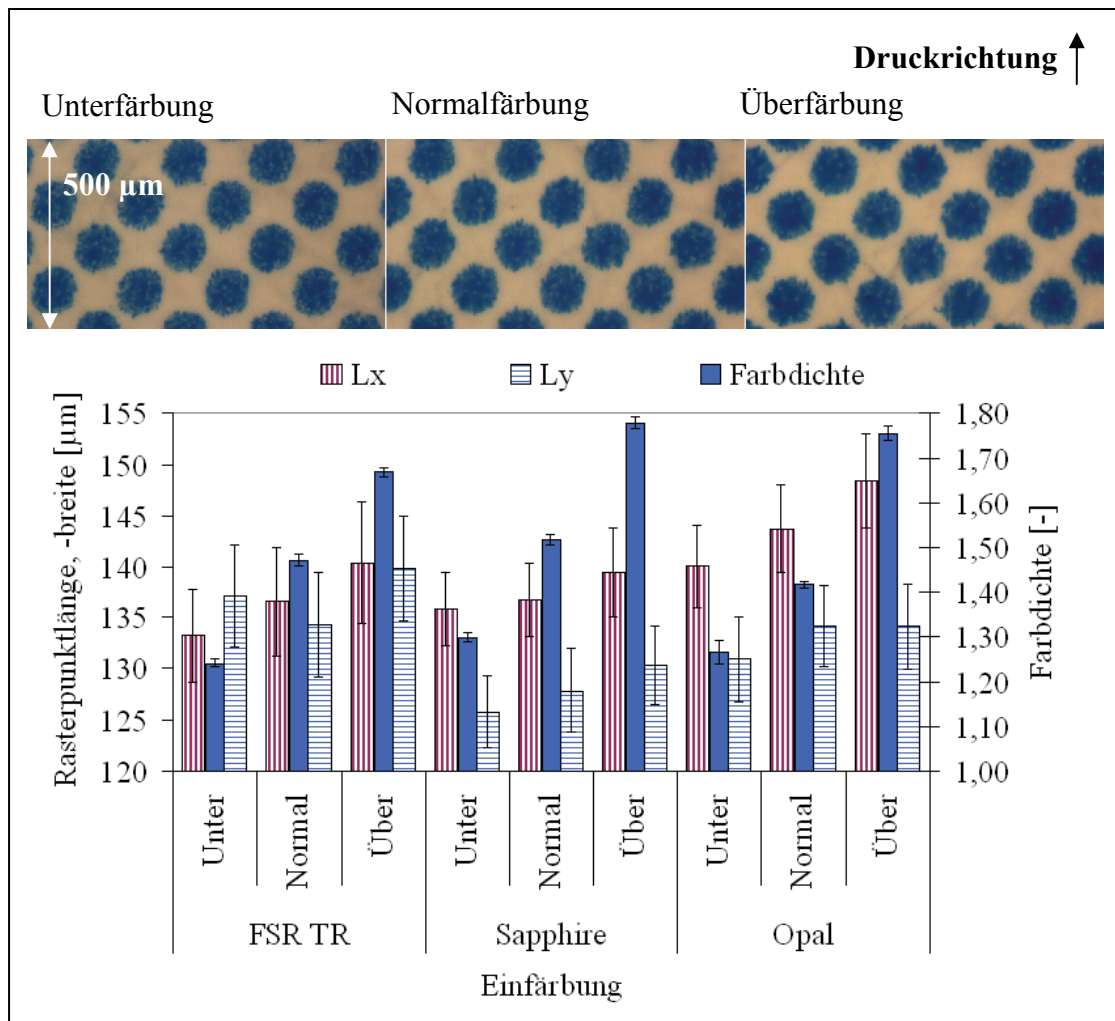
Die mikroskopischen Rasterpunktaufnahmen zeigten am Beispiel des Drucktuchs Opal, dass die Rasterpunkte bei Schmalbahn breit und bei Breitbahn schmal ausgebildet sind. Die Rasterpunktweite nimmt beim Wechseln von Schmal- auf Breitbahn beim Drucktuch FSR TR bzw. Opal um 1,8 % bzw. 3,4 % ab.



**Abbildung 7.13:** Einfluss der Papierlaufrichtung auf die Rasterpunktverbreiterung bei {A, 8000 B/h}. Oben sind am Beispiel des Drucktuchs Opal mikroskopische Rasterpunktaufnahmen bei Schmalbahn- und Breitbahnbogen dargestellt.

#### 7.4.11 Einfluss der Farbdichte

Eine Erhöhung der Farbdichte führt zu einer Erhöhung sowohl der Rasterpunktlänge als auch -breite, Abbildung 7.14. Im Gegensatz zur Druckgeschwindigkeit, die überwiegend die Rasterpunktlänge beeinflusst, handelt es sich bei der Farbdichte um eine Rasterpunktverbreiterung in allen Richtungen (isotrop). Am deutlichsten ist die monotone Zunahme der Farbdichte sowie Rasterpunktlänge und -breite beim Übergang von Unter- zu Überfärbung beim Drucktuch Sapphire zu erkennen. Dabei nehmen die Rasterpunktlänge und -breite um 2,7 % bzw. 3,6 % zu. Die gleichzeitige Zunahme von Rasterpunktlänge und -breite sorgt beim Drucktuch Sapphire für einen von Einfärbung unabhängigen Formfaktor von 1,07, ermittelt bei {A, 8000 B/h}.



**Abbildung 7.14:** Einfluss der Farbdichte auf die Rasterpunktverbreiterung bei {A, 8000 B/h}. Oben sind am Beispiel des Drucktuchs Sapphire mikroskopische Rasterpunktaufnahmen bei Unter-, Normal- und Überfärbung dargestellt.



## 8 Gegenüberstellung der Simulations- und Versuchsergebnisse

Der Vergleich von Simulation und Versuch erfolgt an zwei Ebenen. So wird zunächst untersucht, inwieweit das Rebar-Modell die elementaren Tests (Zug- und Stempelversuch sowie Test am Rollenprüfstand) simulieren kann (Materialebene). Anschließend werden die simulierte und die im Rahmen der Druckversuchsreihe experimentell ermittelte Rasterpunktverformung miteinander verglichen (Verfahrensebene).

### 8.1 Nachrechnung elementarer Belastungsfälle

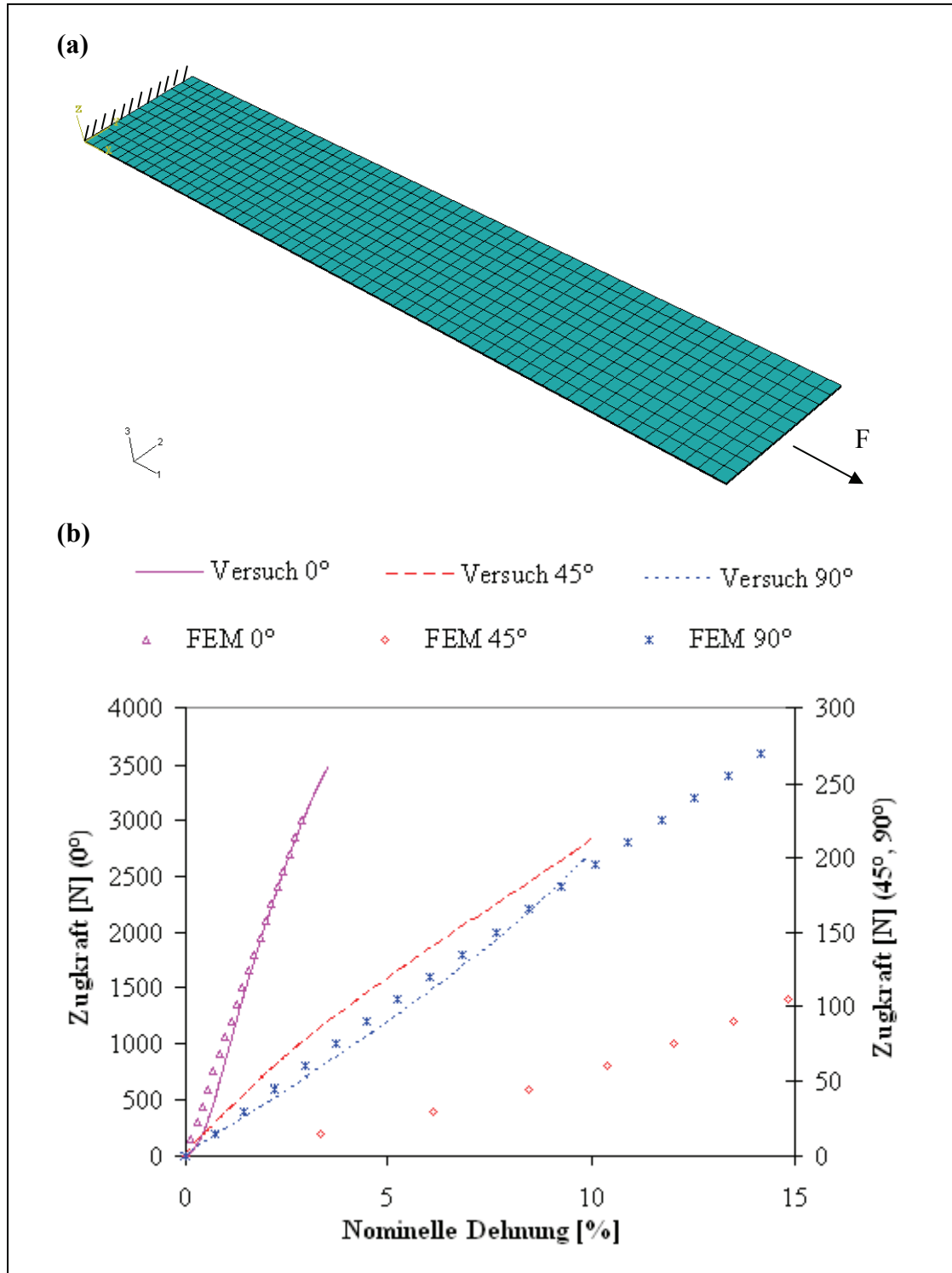
#### 8.1.1 Nachrechnung des Zugversuchs

Die Zugprobe wurde als dreidimensionaler Körper (rechteckige, dicke Scheibe) modelliert, Abbildung 8.1a. Deckschicht und Luftpolsterschicht wurden jeweils mit einer Schicht von Solidelementen vernetzt. Die Gewebeschichten wurden mit Rebar-Flächenelementen diskretisiert. Für die  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -, nicht jedoch die  $45^\circ$ -Richtung, kann die Probensymmetrie ausgenutzt und nur ein Viertel der Probe mit den (13)- und (23)-Transversalebene als Spiegelebene berechnet werden. Das Modell wird an einem Ende festgehalten und am gegenüberliegenden Ende quasistatisch durch eine Zugkraft belastet. Durch ein lokales Koordinatensystem lässt sich der Winkel zwischen Lastrichtung und Kett- bzw. Schussrichtung der Gewebeschichten variieren.

Aufgrund der unsymmetrischen Stapelung der einzelnen Drucktuchschichten zeigte die Simulation des Zugversuchs, dass selbst eine Zugbelastung in  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Richtung eine leichte Verkrümmung der Zugprobenebene hervorruft (Biege-Dehn-Kopplung). Stärkere Verkrümmungen (auch mit Drill-Kopplung) wurden unter  $45^\circ$ -Richtung festgestellt, da mit Rebar-Elementen die Schubsteifigkeit der Gewebeebene einerseits nicht abgebildet werden kann und andererseits die relativ schmale Probe den Einfluss von Randeffekten verstärkt.

Für die Luftpolsterdrucktücher FSR TR und Sapphire konnten gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Versuch in  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Richtung erzielt werden, nicht jedoch unter dem Winkel  $45^\circ$ , der andererseits für die Abrollsimulation nicht relevant ist. Abbildung 8.1b zeigt dies am Beispiel des Drucktuchs FSR TR. Für das konventionelle Drucktuch Opal konnte ebenfalls eine gute Übereinstimmung in  $0^\circ$ -Richtung verzeichnet werden. In  $90^\circ$ -Richtung wurden allerdings höhere Kräfte gerechnet als im Versuch ermittelt, da die Deckschicht eine zusätzliche, nicht mehr zu vernachlässigende Steifigkeit mit sich bringt. Deshalb wird die Steifigkeit der Deckschicht soweit

reduziert, bis Versuch und Simulation in 90°-Richtung miteinander gut übereinstimmen. Dies konnte erreicht werden, indem die elastischen Konstanten  $C_{10}$  und  $C_{01}$  nach Tabelle 5.6 um den Faktor 10 herunterskaliert wurden. Die auf dieser Weise gewonnenen Konstanten  $C_{10}^*$  und  $C_{01}^*$  sind in Tabelle 8.1 angegeben.



**Abbildung 8.1:** Simulierte Kraft-Dehnungs-Verläufe für das Drucktuch FSR TR. (a) FE-Modell. (b) Simulierte und experimentelle Kurven.

Opal		
$C_{01}^*$ [MPa]	$C_{10}^*$ [MPa]	$D_1$
0,23648	0,55840	0

**Tabelle 8.1:** Nachkorrigierte Materialparameter für die hyperelastische Deckschicht des Drucktuchs Opal. Verzerrungsenergiefunktion nach Mooney-Rivlin.

Die Materialstabilität nach Gl. 5.36 bleibt beim Skalieren erhalten. Aus diesen Konstanten lässt sich dann für das Drucktuch Opal ein linearisierter Elastizitätsmodul der Deckschicht aus

$$E = 6(C_{10}^* + C_{01}^*) \quad (8.1)$$

zu  $E = 4,7$  MPa errechnen, der in gleicher Größenordnung liegt wie bei den Luftpolsterdrucktüchern (siehe Gl. 5.37.)

In 45°-Richtung weichen beim Drucktuch Opal Simulation und Versuch erheblich voneinander ab aus demselben Grund wie bei den Luftpolsterdrucktüchern.

### 8.1.2 Nachrechnung des Stempelversuchs

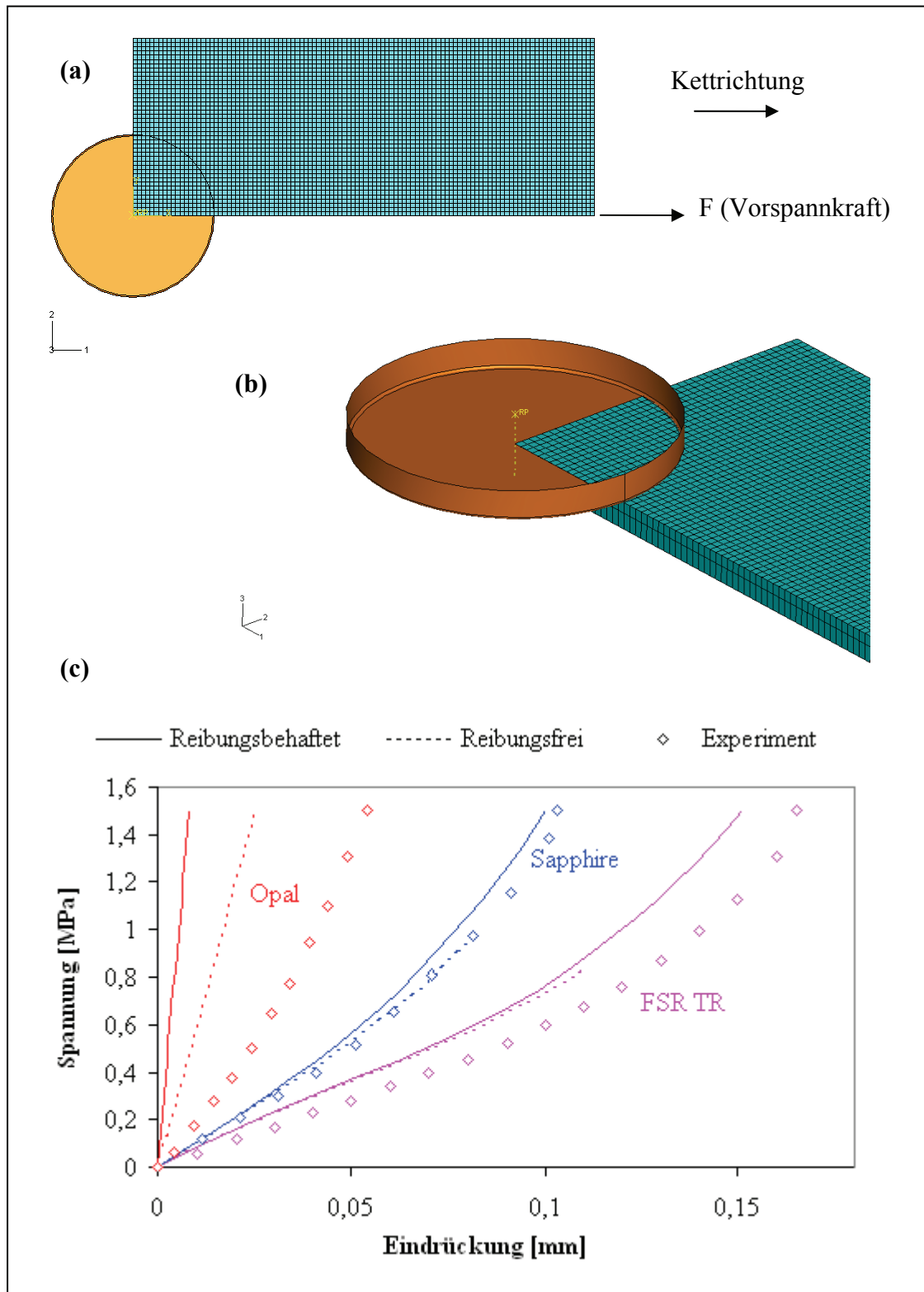
Das FE-Modell aus der Simulation des Zugversuchs wurde auf die Abmessungen der Stempelprobe angepasst. Das Modell wurde zuerst auf 1,5 % Dehnung gebracht, wobei die Kettrichtung in Spannrichtung liegt. Aus Symmetriegründen muss nur ein Viertel des Modells berechnet werden, Abbildung 8.2a, b. Danach erfolgte die quasi-statische Belastung in Dickenrichtung durch einen als starren Körper angenommenen Stempel mit runder, flacher Grundfläche, um die Federkennlinie nachzurechnen.

Für alle Drucktücher wurden jeweils zwei Varianten gerechnet, deren Ergebnisse in Abbildung 8.2c zusammengefasst sind. Es wurde nämlich von zwei Reibungszuständen zwischen Stempel und Probenoberfläche ausgegangen:

- Der Stempel kann sich reibungsfrei in die Probenoberfläche einsenken.
- Zwischen Stempel und Probenoberfläche herrscht eine hohe Haftreibungszahl von  $\mu_H = 1,0$ .

Bei der Simulation zeigte sich für beide Reibungszustände bei den Luftpolsterdrucktüchern kein großer Unterschied in der Federkennlinie. Der Grund dafür liegt darin, dass sich die Deckschicht dank der hohen Kompressibilität der Luftpolsterschicht nahezu

normal zur Stempelgrundfläche in das Innere des Drucktuchs einsenken kann – unabhängig von dem Reibungszustand.



**Abbildung 8.2:** Simulierte und experimentelle Federkennlinien. (a) FE-Modell. (b) Perspektivische Darstellung. (c) Federkennlinien. Bei den Rechenvarianten mit Reibung beträgt die Haftreibungszahl 1,0.



Beim konventionellen Drucktuch resultiert aufgrund der Inkompressibilität der im gesamten Modell einzig verformbaren Deckschicht ein größerer Unterschied zwischen beiden Reibungszuständen. Durch das Eindringen des Stempels muss das Material seitlich ausweichen, wodurch tangentielle Relativbewegungen zwischen Stempel und Deckschicht entstehen, die ihrerseits zu unterschiedlichen Federkennlinien führen, je nachdem ob sie durch Haften oder Gleiten unterdrückt oder zugelassen werden.

Gute qualitative und quantitative Übereinstimmungen zwischen Simulation und Versuch konnten bei den kompressiblen Drucktöchern erzielt werden. Beim Drucktuch Opal, das mit den nachkorrigierten Materialkonstanten  $C_{10}^*$  und  $C_{01}^*$  nach Tabelle 8.1 gerechnet wurde, sind die Abweichungen zwischen simulierter und experimenteller Federkennlinie selbst unter der Annahme der Reibungsfreiheit noch zu groß, da bei diesem Drucktuch die noch unbekannte Nachgiebigkeit der Gewebeschichten das Dickenverhalten deutlich stärker mitbestimmt als bei den kompressiblen Drucktöchern. Deshalb wird dieses Drucktuch bei der Abrollsimulation nicht weiter behandelt.

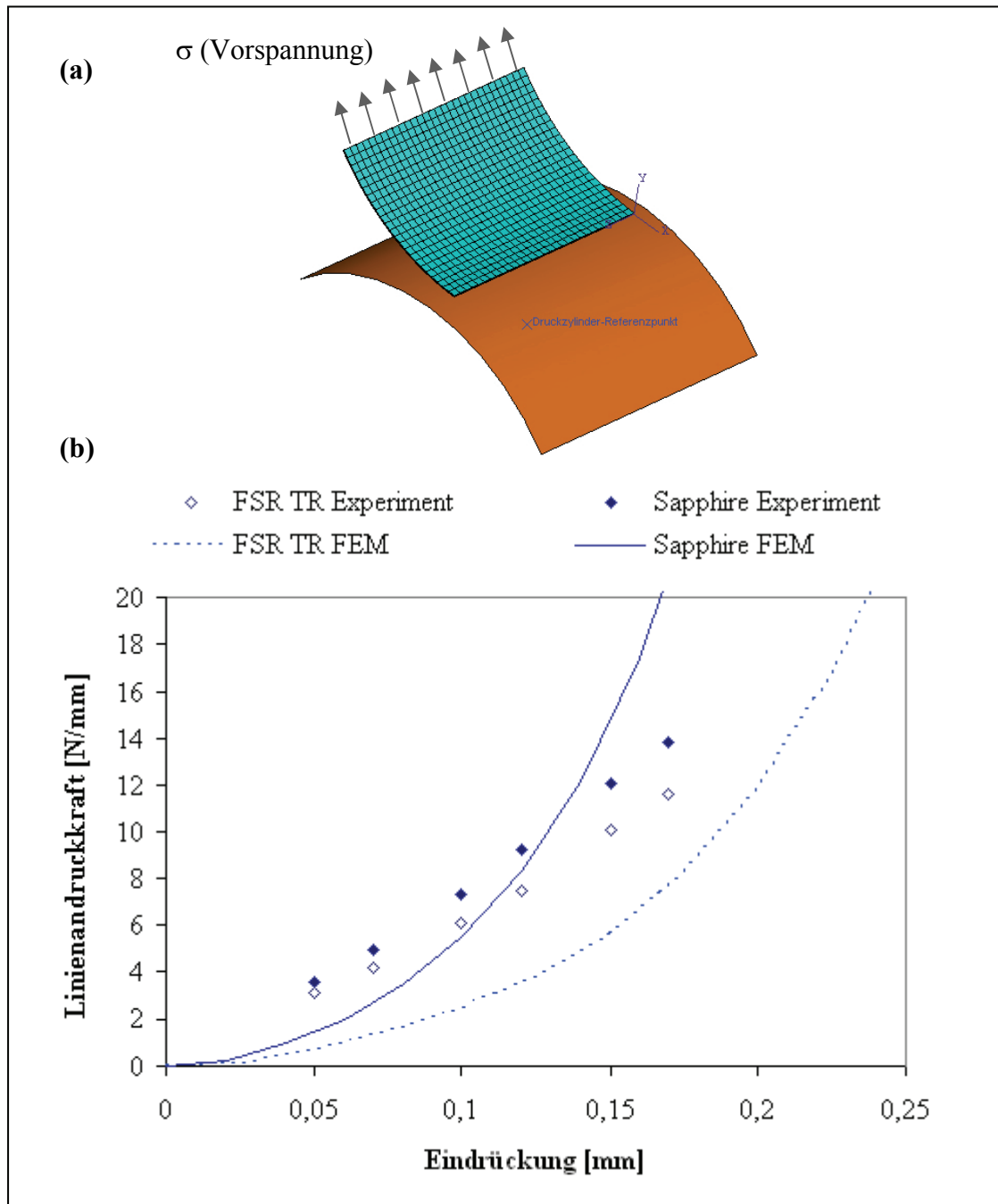
### 8.1.3 Nachrechnung des Abrollversuchs (Rollenprüfstand)

Das System aus Drucktuch, Gummi- und Gegendruckzylinder wurde vereinfachend durch ein statisches FE-Modell abgebildet, bei dem kein Abrollen stattfindet (Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 0$ ). Es wird lediglich eine Eindrückung eingestellt und die dadurch hervorgerufene Andruckkraft ermittelt, Abbildung 8.3a.

Die Kettrichtung der Gewebeschichten liegt in Zylinderumfangsrichtung, und wiederum wurde die Symmetrie genutzt, um nur ein Viertel des mit Drucktuch bespannten Gummizylinders zu berechnen. Eine Streckenlast soll das Drucktuch auf 1,5 % Dehnung vorspannen. Gummi- und Druckzylinder wurden als starre Oberflächen modelliert. Die Vernetzung des Drucktuchs lässt sich in Richtung Kontaktzone hin verfeinern, um Kontaktspannungen und -länge genauer abzubilden. Die Andruckkraft wurde wie im Versuch auf Basis der radialen Komponente der Gegendruckzylinderlagerkraft ermittelt und auf die Drucktuchbreite bezogen.

Die simulierte Linienandruckkraft zeigt sowohl beim Drucktuch FSR TR als auch Sapphire durch den deutlicheren progressiven Verlauf eine im Vergleich zur experimentell ermittelten Kraft eine stärkere Abhängigkeit von der Eindrückung auf, Abbildung 6.4b. Weder eine qualitative noch eine quantitative Übereinstimmung zwischen Simulation und Abrollversuch konnte hier verzeichnet werden. Als Grund dafür könn-

te vor allem der Einfluss der im Rebar-Modell noch nicht enthaltenen, zeitabhängigen Drucktucheigenschaften angesehen werden.



**Abbildung 8.3:** Mit der FEM quasistatisch nachgerechnete und dynamische Linienandruckkraft. Haftreibungszahl  $\mu_H = 1,0$ . (a) FE-Modell. (b) Simulierte und experimentelle Kraft-Eindrückungs-Kurven.

#### 8.1.4 Fazit

Mit dem Rebar-Modell lassen sich der Zugversuch in den für den Druckprozess relevanten Richtungen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  sowie der Stempelversuch gut simulieren. Diskrepanzen

ergaben sich bei der Simulation des Zugversuchs in 45°-Richtung. In dieser Hinsicht kann das Modell noch verbessert werden.

Diskrepanzen sind außerdem im Abrolltest bei der Linienandruckkraft festzustellen, die experimentell für verschiedene Eindrückungen bei einer Druckgeschwindigkeit von 5 m/s ermittelt wurde. Im Versuchsbetrieb wurde diese Geschwindigkeit zwar nicht erreicht und stattdessen mit Geschwindigkeiten von etwa 1,5 m/s (8000 B/h) gedruckt. Hier besteht dennoch wiederum Bedarf an Verbesserung des quasistatischen Rebar-Modells durch Berücksichtigung der viskoelastischen Drucktucheigenschaften.

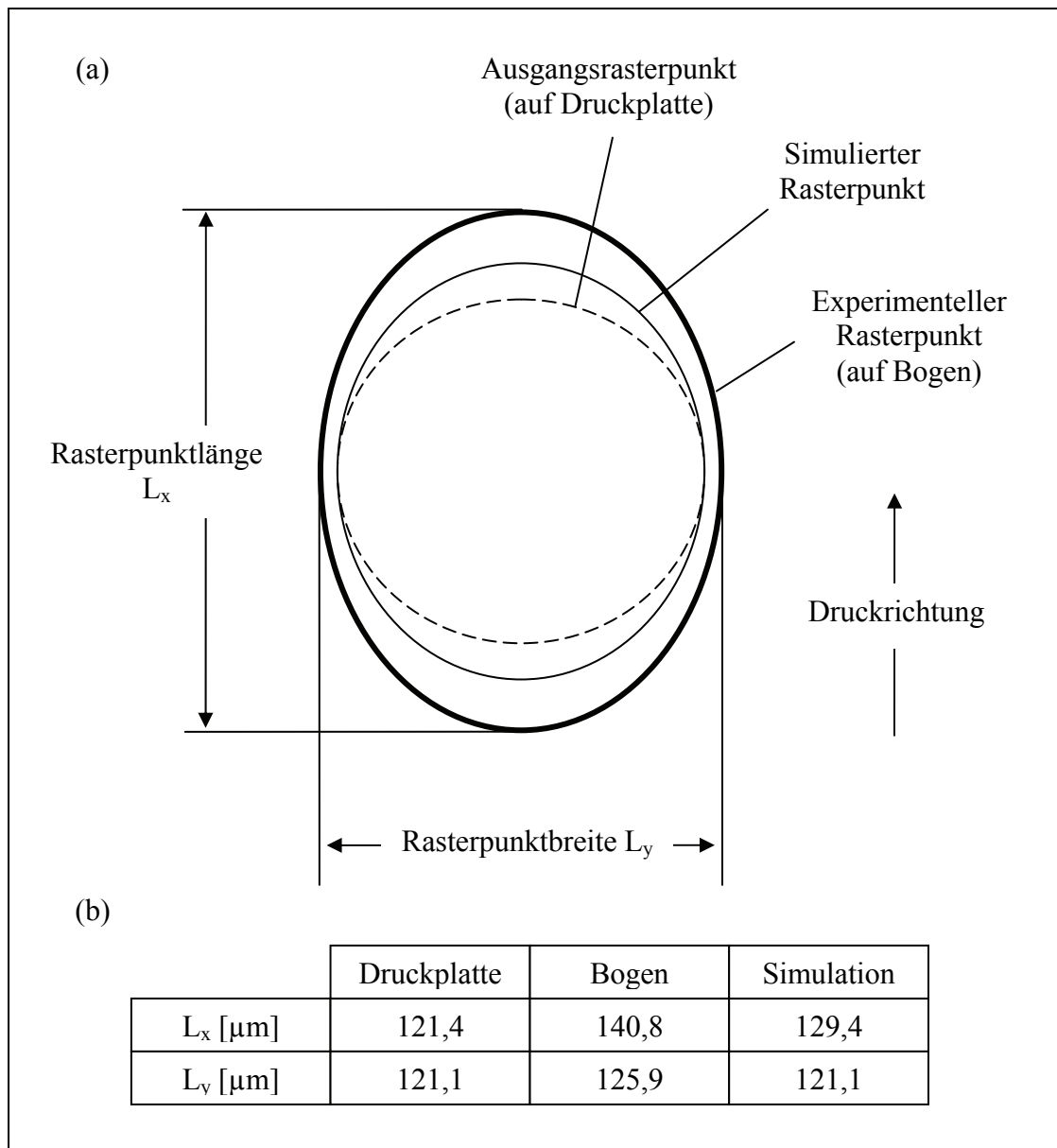
## 8.2 Vergleich der Ergebnisse aus Abrollsimulation und Druckversuchsreihe

Der Einfluss des Drucktuchaufbaus und der Druckabwicklung auf die Rasterpunktübertragung konnte sowohl anhand der Abrollsimulation als auch im Experiment nachgewiesen werden. Dies wurde exemplarisch anhand der Druckabwicklungen {A, 8000 B/h} und {C, 8000 B/h} gezeigt, die im Simulationsteil etwa den Durchmesserhältnissen I und II entsprechen, wie sich dies am Trapez-Diagramm verifizieren lässt (siehe Abbildung 6.3).

Der Einfluss des Drucktuchaufbaus wurde in der Simulation auf der Basis des Durchmesserhältnisses II ( $\varnothing_{\text{Drucktuch}} > \varnothing_{\text{Druckplatte}}$ ) durch Auswertung der Schlupfwege in der Berührzone zwischen Drucktuch und Druckplatte für die beiden Drucktücher FSR TR und Sapphire gezeigt (Abbildung 5.25). Letztes wies durch größere Schlupfwege in der Auslaufzone eine höhere Schiebeempfindlichkeit auf, die im experimentellen Teil durch mikroskopische Auswertung der Rasterpunktlänge festgestellt werden konnte (Abbildung 7.9).

Der Einfluss des Durchmesserhältnisses wurde in der Simulation am Beispiel des Drucktuchs Sapphire für die Durchmesserhältnisse I und II gezeigt (Abbildung 5.23). Im Experiment ließ sich dieser Einfluss wiederum anhand mikroskopischer Rasterpunktvermessungen auf Bogen nachweisen, die mit dem einen und selben Drucktuch (Sapphire), jedoch bei verschiedenen Druckabwicklungen ({A, 8000 B/h} und {C, 8000 B/h}) gedruckt wurden (Abbildung 7.10).

Abbildung 8.4 zeigt am Beispiel des Drucktuchs Sapphire einen Vergleich zwischen der auf der Druckplatte und dem Druckbogen mikroskopierten bzw. durch Simulation ermittelten Rasterpunktform, wenn das Drucktuch einen größeren Durchmesser hat als die Druckplatte.



**Abbildung 8.4:** Vergleich des simulierten und experimentellen Rasterpunkts am Beispiel des Drucktuchs Sapphire ( $\varnothing_{\text{Drucktuch}} > \varnothing_{\text{Druckplatte}}$ ).  $L_x$ : Rasterpunktlänge.  $L_y$ : Rasterpunktbreite. (a) Rasterpunktformen (b) Rasterpunktabmessungen.

Die bildanalytisch ermittelten Abmessungen des Rasterpunkts auf der Druckplatte deuten mit etwa gleicher Rasterpunktlänge und -breite auf einen nahezu runden Rasterpunkt hin (vgl. Abschnitt 7.4.3). Der auf dem Bogen ebenfalls bildanalytisch ermittelte Rasterpunkt weist dagegen eine elliptische Form auf (vgl. Abschnitt 7.4.6). Am Beispiel des Drucktuchs Sapphire wurde mit dem Rebar-Modell ein Schlupf in Druckrichtung von etwa  $9 \mu\text{m}$  errechnet, der zu einer ebenfalls länglichen Rasterpunktform führt (vgl. Abschnitt 5.7.3). Würden die Abmessungen des Rasterpunkts auf der Druckplatte (Ausgangsabmessungen) zugrunde gelegt, so würde sich ohne Berück-

sichtigung der Druckfarbe der Schlupf ( $9\text{ }\mu\text{m}$ ) zur Ausgangslänge ( $121,4\text{ }\mu\text{m}$ ) addieren und zu einem insgesamt  $129,4\text{ }\mu\text{m}$  langen Rasterpunkt führen. Eine Veränderung der Rasterpunktbreite infolge Abrollung konnte das Rebar-Modell nicht erfassen. In Bezug auf die auf dem Druckbogen experimentell ermittelte Rasterpunktlänge ( $140,8\text{ }\mu\text{m}$ ) bzw. -breite ( $125,9\text{ }\mu\text{m}$ ) würde somit die simulierte Rasterpunktlänge ( $129,4\text{ }\mu\text{m}$ ) bzw. -breite ( $121,1\text{ }\mu\text{m}$ ) um etwa 8 % bzw. 4 % von den entsprechenden experimentellen Werten abweichen.

Im Rahmen der untersuchten Drucktücher und Druckabwicklungen konnte somit zwischen Simulation und Experiment eine qualitative Übereinstimmung in Bezug auf die Rasterpunktlängung erreicht werden. Quantitative Vergleiche z. B. bezüglich der Rasterpunktabmessungen können jedoch nicht angegeben werden, da die Simulation vor allem auf quasistatischer Betrachtung des Abrollvorgangs zwischen Drucktuch und Druckplatte basiert sowie die mechanischen Papiereigenschaften und die rheologischen Farbeigenschaften nicht berücksichtigt.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit war dadurch motiviert, die Berechnungsgrundlagen für Offset-Druckwerke im Allgemeinen und für Drucktücher im Speziellen zu erweitern. Es wurde gezeigt, wie das mechanisch-drucktechnische Verhalten einer komplexen Struktur wie des Drucktuchs neben dem in der Druckpraxis etablierten experimentellen Weg (anhand von Druckversuchen) auch rechnerisch (anhand der numerischen Simulation) untersucht werden kann.

Hauptziel der Arbeit ist, einen Zusammenhang zwischen den mechanischen und den drucktechnischen Eigenschaften eines Drucktuchs derart herzustellen, dass sich das drucktechnische Verhalten allein durch die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften voraussagen lässt, die sich aus in der Druckpraxis etablierten Standardtests ergeben. Standardtests würden auf dieser Weise zeit- und kostspielige Druckversuche, mit denen das Verhalten des Drucktuchs im Druckprozess zeigen lässt, weitgehend reduzieren.

Als Kriterium zur Beurteilung des drucktechnischen Verhaltens wurde die Rasterpunktverbreiterung, also die Veränderung der Rasterpunktform durch den rollenden Kontakt zwischen Drucktuch und Druckplatte bzw. Bogen zugrunde gelegt.

Die Aufgabe wurde in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wurde das mechanisch-drucktechnische Drucktuchverhalten mithilfe der Methode der finiten Elemente simuliert. Eine Reihe von Druckversuchen sollte im zweiten Aufgabenteil die Rasterpunktverbreiterung für verschiedene Drucktuchaufbauten und Druckabwicklungen experimentell aufzeigen und als Vergleich mit den Simulationsergebnissen dienen. Beide Aufgabenteile wurden im Anschluss zum Abschnitt „Stand der Technik und der Wissenschaft“ dargestellt, der einen Überblick über die wichtigsten Untersuchungen der letzten dreißig Jahre zum mechanisch-drucktechnischen Verhalten von Drucktüchern vermittelte.

Bei der numerischen Simulation wurden Aufbau und Funktion eines Drucktuchs in ein mechanisches Modell abstrahiert. So wurde das Drucktuch in druckende und tragende Schichten aufgeteilt. Erste werden von den elastomeren Schichten gebildet, wirken hauptsächlich in Dickenrichtung und sind somit für den Aufbau eines definierten Anpressdrucks in der Berührzone zwischen Drucktuch und Druckplatte bzw. Bogen verantwortlich (daher die Bezeichnung als „druckend“). Letzte bestehen aus den Gewebeschichten, die in erster Linie in Drucktuchebene wirken und für Aufbau und

Aufrechterhaltung der Drucktuchvorspannung sorgen, woraus die Bezeichnung „tragend“ abgeleitet wurde.

Für jede Schicht wurde ein Materialmodell festgelegt, um das Verformungsverhalten derselben unter mechanischer Einwirkung zu beschreiben. So wurde die Deckschicht als linearelastischer, ideal inkompressibler, die Luftpolsterschicht dagegen als schaumelastischer Körper mit angenommen verschwindender Querdehnzahl betrachtet. Es wurde außerdem angenommen, dass das mechanische Verhalten der Gewebeschichten in ihrer Ebene sich durch ein linearelastisches Materialgesetz beschreiben lässt. Zum jeweiligen Materialmodell gehörten Materialparameter, die experimentell anhand des in der Druckpraxis etablierten, quasistatischen Zug- bzw. Stempelversuchs bestimmt wurden.

Das auf dieser Weise gewonnene Drucktuchmodell wurde anschließend in ein dreidimensionales Finite-Element-Modell umgesetzt, um anschließend die Abrollung von Drucktuch und Druckplatte zu simulieren. Wurden dabei die elastomeren, hauptsächlich in Dickenrichtung wirkenden Schichten mit linearen Hexaederelementen diskretisiert, so wurden für die überwiegend in ihrer Ebene tragenden Gewebeschichten Rebar-Flächenelemente eingesetzt.

Eine Nachrechnung des Zug- bzw. Stempelversuchs mithilfe des erstellten Finite-Element-Modells zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch im Hinblick auf die Federkennlinie sowie auf die elastischen Eigenschaften in Kett- und Schussrichtung. Eine große Abweichung wurde jedoch beim Zugversuch unter dem Winkel  $45^\circ$  aufgrund fehlender Schubsteifigkeit der Rebar-Flächenelemente festgestellt, was jedoch der Einsatzberechtigung des Finite-Element-Modells zur Simulation des Abrollvorgangs nicht vermindert, da das Drucktuch in die Druckmaschine ausschließlich in Kettrichtung montiert wird.

Eine weitere Abweichung wurde beim Vergleich der einerseits auf Basis des quasistatischen Finite-Element-Modells simulierten und der anderseits experimentell gemessenen Kontaktnormalkraft festgestellt. Letzte wurde an einem Rollenprüfstand bei einer Druckgeschwindigkeit von 5 m/s gemessen. Da jedoch im experimentellen Aufgabenteil mit relativ geringer Geschwindigkeit (ca. 1 m/s) gedruckt wurde, wurde versucht, den Abrollvorgang zwischen Drucktuch und Druckplatte mit dem quasistatischen Finite-Element-Modell zu simulieren. Dabei konnten mit dem Finite-Element-Modell der Kontaktnormaldruck und die Schlupfwege in der Berührzone zwischen



Drucktuch und Druckplatte für unterschiedliche Drucktücher und unterschiedliche Druckabwicklungen simuliert werden. Für die Drucktücher wurden unterschiedliche Schlupfwege berechnet, die ihrerseits dann auf unterschiedliche Schiebeneigungen der auch unterschiedlich gebauten Drucktücher hindeuten.

Im zweiten Aufgabenteil konnte die unterschiedliche Schiebeneigung der Drucktücher anhand einer Reihe von Druckversuchen an einer Bogenoffsetdruckmaschine des Fachgebiets Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt auch auf experimentellem Weg anhand des Kriteriums Rasterpunktverbreiterung gezeigt werden, womit eine qualitative Übereinstimmung zwischen der Simulations- und der Versuchsergebnisse erreicht werden konnte. Dargestellt wurde außerdem eine Methodik zur Planung, Durchführung und mikroskopische Auswertung von vergleichenden (Bogenoffset-) Druckversuchen. Weitere Einflüsse auf die Rasterpunktverbreiterung, wie z. B. die Papierlaufbahn oder die Druckgeschwindigkeit, wurden ebenfalls experimentell gezeigt. Dazu konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch keine Rechenmodelle erstellt werden.

Zusammenfassend kann mit dem in dieser Arbeit durch Abstraktion von Funktion und Werkstoffverhalten erstellten und anhand von Standardtests werkstofftechnisch charakterisierten Drucktuchmodell ein Bild über die Schiebeempfindlichkeit des Drucktuchs gewonnen und – in Bezug auf dieses Kriterium – ein Zusammenhang zwischen den mechanischen und drucktechnischen Drucktucheigenschaften hergeleitet werden.

### **Ausblick**

Das erstellte Rechenmodell zur Simulation der mechanisch-drucktechnischen Drucktucheigenschaften basiert auf einer Reihe von Vereinfachungen, die einerseits eine Simulation des Abrollvorgangs zwischen Drucktuch und Druckplatte auf Basis unvollständiger Materialparameter zu lassen, andererseits jedoch noch keine quantitative Voraussage des Druckergebnisses ermöglichen. Zu diesen Vereinfachungen gehören insbesondere:

- Die Gewebeschichten sind in Dickenrichtung starr, sodass eine Eindrückung an der Drucktuchoberfläche von den elastomeren Schichten aufgefangen wird.
- Die Luftpolsterschicht wurde mit einer konstanten verschwindenden Querdehnzahl versehen.

- Das Materialverhalten einzelner Schichten wurde nicht für jede Schicht getrennt und räumlich charakterisiert.
- Die viskoelastischen Eigenschaften der elastomeren Schichten wurden nicht in das Drucktuchmodell mit einbezogen.
- Die Abrollung von Drucktuch und Druckbogen wurde nicht berücksichtigt.
- Bei der Abrollsimulation konnte nur ein Teil der Zylinder modelliert und berechnet.

Die genauere Untersuchung all dieser Punkte im Hinblick auf realitätsnähere Modellansätze und zuversichtlichere Rechenmodelle ist sicherlich im Rahmen weiterführender Arbeiten sehr sinnvoll.

## 10 Literaturverzeichnis

- [ABQ06] Abaqus Version 6.6, Documentation Collection, Abaqus Inc., 2006.
- [ALE02] Alexandrov, V. M.; Pozhazkii, D. A.: Three-Dimensional Contact Problems. Solid Mechanics and its Applications, Vol. 93, Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [AUG95] Augsberg, G.; Stock, Th.: Gummituchtests. MAN Roland AG, Offenbach, 1995.
- [AUL00] Aull, M.: Lehr- und Arbeitsbuch Druck. 6. Auflage, Itzehoe: Verlag Beruf + Schule, 2000.
- [BEC02] Becker, W.; Gross, D.: Mechanik elastischer Körper und Strukturen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [BER01] Bergström, J. S.; Boyce, M. C.: Constitutive Modeling of the Time-Dependent and Cyclic Loading of Elastomers and Application to Soft Biological Tissues. Mechanics of Materials, Vol. 33, Nr. 5, S. 523-530, 2001.
- [BER98] Bergström, J. S.; Boyce, M. C.: Constitutive Modelling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 46, Nr. 5, S. 931-954, Mai 1998.
- [BOH97] Bohan, M. F. J.; Claypole, T. C.; Gethin, D. T.; Basri, S. B.: Application of Boundary Element Modelling to Soft Nips in Rolling Contact, TAGA Proceedings, S. 135-148, 1997.
- [BOH98] Bohan, M. F. J.; Claypole, T. C.; Gethin, D. T.: Boundary Element Modelling of Printing and Coating Nips in a Sliding Contact. TAGA Proceedings, S. 371-387, 1998.
- [BRA93] Braat, G. F. M.: Theory and Experiments on layered, viscoelastic cylinders in rolling contact. Dissertation, Technische Universität Delft, Niederlande, 1993.
- [BRO05] Brockhaus Enzyklopädie in 30 Bänden. 21. Auflage, Leipzig, Mannheim: Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2005.
- [CHA98] Chang, F. S.; Song, Y.; Lu, D. X.; DeSilva, C. N.: Unified Constitutive Equations of Foam Materials. Journal of Engineering Materials and Technologies, Transactions of the ASME, Vol. 120, 1998.

- [DÖR07] Dörsam, E.: Druckmaschinen und -systeme I. Theorie der viskoelastischen Walzenkontakte. Vorlesungsskript, Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, 2007.
- [DRU60] N.N.: Druckkräfte und Druckverteilung im Berührgebiet der Zylinder einer Bogenoffsetrotationsmaschine. Bericht aus den 60er oder 70er Jahren (Autor unbekannt). Bibliothek des Fachgebiets Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt.
- [DUN72] Offset Litho Blankets. A Dunlop Technical Publication, 1972.
- [DUR81] Durst, F.; Melling, A.; Whitelaw, J. H.: Principles and Practice of Laser-Doppler-Anemometry. London: Academic Press, 1981.
- [FAL82] Falter, K.-A.: Dynamische und drucktechnische Eigenschaften von Offsetpapieren unter besonderer Berücksichtigung der Kurzzeitbelastung. FOGRA-Mitteilungen, Nr. 112, 32. Jahrgang, April 1983.
- [FOG77a] Laubmann, G.: Vergleichende Gummituch-Untersuchungen. Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik e.V. (FOGRA), Juni 1977.
- [FOG77b] Laubmann, G.: Die richtige Auswahl des Gummituches. FOGRA-Mitteilungen Nr. 94, Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik e.V., Dezember 1977.
- [FOG77c] Loibl, D.: Vergleichende Gummituch-Untersuchungen. Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik e.V. (FOGRA), Technische Vorträge 1977/78.
- [FOG78] Loibl, D.; Neuss, D.; Laubmann, G.: Mechanisches und drucktechnisches Verhalten von Offset-Drucktüchern. FOGRA-Forschungsbericht 3.221, Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik e.V., 1978.
- [FOG79] FOGRA-Mitteilungen. 28. Jahrgang, Nr. 98, März 1979.
- [FUC94] Fuchs, B.: Offsetgummitücher und ihr Einfluss auf die Druckqualität. IFRA Special Report 3.22, September 1994.
- [GLÜ76] Glück, M.: Untersuchung des Rollverhaltens von Mehrwalzen-Systemen unter Einbeziehung einer viskoelastischen Walze. Dissertation, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, TH Darmstadt, 1976.

- [HAH92] Hahn, H. G.: Technische Mechanik. 3. durchges. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [HAL76] Haller, K.; Loibl, D.:  
Zeitungs-Herstellung – Untersuchungen über neuere Methoden der Zeitungsherstellung. Forschungsbericht 2.111, Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik e.V.; Bundesverband Druck e.V., 1976.
- [HAM97] Hammele, W.: Ermittlung der elastischen und viskoelastischen Kennwerte von Polymerwerkstoffen durch Rollkontaktversuche. Fortschrittsbericht VDI Reihe 5 Nr. 492, Dissertation, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- [HAN03] Han, W.; Sofonea, M.: Quasistatic Contact Problems in Viscoelasticity and Viskoplasticity. Studies in Advanced Mathematics, Volume 30, American Mathematic Society, 2003.
- [HAN79] Hansen, Å.: About the physical conditions in the printing zones in offset presses and its relation to print quality, characterisation and optimization. The 15<sup>th</sup> IARIGAI Conference, Norway, 1969.
- [HDM85] Heidelberg MO-Multicolor. Bedienungseinleitung für Zweifarben- bis Vierfarben-Modelle 48 x 64 cm, Heidelberger Druckmaschinen AG, 1985.
- [HDM92] Grundlagen der Qualitätskontrolle – Densitometrie. Heidelberger Druckmaschinen AG, 1992.
- [HDM99] Farbe und Qualität. Heidelberger Druckmaschinen AG, 2. Auflage, 1999.
- [HEI88] Heine, H.; Pöller, M.: Offset-Drucktücher für den Endlosformulardruck. Informationen des Bundesverbands Druck, Art.-Nr. 86925, Wiesbaden, 1988.
- [HEL93] Helbig, Th.: Druckqualität – Grundlagen der Qualitätsbewertung im Offsetdruck. Frankfurt am Main: Polygraph Verlag, 1993.
- [HER03a] Herrmann, J.: Drucktücher für den Rollenoffset. Vortrag VDD-Seminar, Darmstadt, 06. Dezember 2003. ([www.vdd-net.de](http://www.vdd-net.de) → VDD-Seminare).

- [HER03b] Herrmann, J.: Der optimale Kompromiss: Das richtige Drucktuch für den richtigen Zweck. AWT-Vortrag, Contitech Elastomer-Beschichtungen GmbH, Northheim, 04. Juni 2003.
- [HEY75] Heyne, M. J. M.; Lenaarts, W.: Offsetrubberdoeken. IGT-verhandeling 5, Instituut voor Grafische Techniek TNO, Amesterdam, 1975.
- [JOH85] Johnson, K. L.: Contact Mechanics. Cambridge U. K.: Cambridge University Press, 1985.
- [JOH99] Johannknecht, R.: The Physical Testing and Modelling of Hyperelastic Materials for Finite Element Analysis. Fortschrittsberichte VDI Nr. 302, Dissertation: VDI-Verlag, 1999.
- [KAL91] Kalker, J. J.: Viscoelastic multilayered cylinders rolling with dry friction. Journal of Applied Mechanics, 58, S. 666-679, 1991.
- [KET75a] Kettinger, R.; Lospichl, R. v.: Die Einflüsse von Gummituch und Aufzug auf die Druckabwicklung im Offsetdruck. Teil 1. FOGRA-Mitteilungen Nr. 84, Juni 1975.
- [KET75b] Kettinger, R.; Lospichl, R. v.: Die Einflüsse von Gummituch und Aufzug auf die Druckabwicklung im Offsetdruck. Teil 2. FOGRA-Mitteilungen Nr. 85, September 1975.
- [KIP00] Kipphan, H. (Hrsg.): Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2000.
- [KLE06] Kleppmann, W.: Taschenbuch der statistischen Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 4. überarbeitete Auflage, München: Hanser-Verlag, 2006.
- [LIN00] Lind, J. T., MacPhee, J.: The Relationship Between Paper Properties and the Optical and Mechanical Dot Gain of Prints. TAGA Proceedings, S. 745-763, 2000.
- [LÜR01] Lürding, D.: Modellierung großer Deformationen in orthotropen, hyperelastischen Schalenstrukturen. Mitteilungen aus dem Institut für Mechanik, Mitteilung Nr. 125, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, März 2001.

- [MAC04] Mackerle, J.: Rubber and rubber-like materials, finite-element analyses and simulations, an addendum: a bibliography (1997-2003). *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Nr. 12, S. 1031-1053, 2004.
- [MAR82] Marschner, L. J.: *Das System Birkan – Das Offsetdrucktuch, die Aufzugskennlinie und der Weg zur optimalen Einstellung, mit praktischen Anwendungsbeispielen*. Birkner & Kandelbinder Drucktuchvertrieb, 1982.
- [MAT06] Online-Help, Matlab R2006a, Image Processing Toolbox Demos → Measuring Image Feature → Identifying Round Objects. The MathWorks Inc., 2006.
- [MEI68] Meijers, P.: The contact problem of a rigid cylinder on an elastic layer. *Applied Science Research*, 18, S. 666-679, 1991.
- [MIC99] Michel, R.: *Modellierung des Verhaltens von Papier und Gummituch im Druckspalt von Offsetdruckmaschinen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 1999
- [MIL69] Miller, R. D. W.: Printing blanket properties and nip conditions on two blanket testing instruments. The 10<sup>th</sup> IARIGAI Conference, Austria, 1969.
- [MUL47] Mullins, L.: Effect of Stretching on the Properties of Rubber. *Journal of Rubber Research*, Vol. 16, S. 275–289, 1947.
- [OTT95] Ottersbach, J.: *Bedruckstoff und Farbe. Eine Werkstoffkunde für Drucker und andere Fachleute der Druckindustrie*. 3., erweiterte Auflage, Itzehoe: Verlag Beruf + Schule, 1995.
- [PFE70] Pfeiffer, G.: *Beitrag zum Problem der Rollvorgänge in Druckmaschinen unter besonderer Berücksichtigung der visko-elastischen Eigenschaften von Walzenbelägen*. Dissertation, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, TH Darmstadt, 1970.
- [PHA02] Phan-Thien, Nhan: *Understanding Viscoelasticity*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002
- [REC69] Rech, H.: *Farbübertragung auf Offsetdrucktücher*. *Mitteilungen Forschungsgesellschaft Druck e.V.*, Heft 1, 1969.

- [RÖT06] Röthemeyer, F.; Sommer, F. : Kautschuk Technologie – Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte. 2. überarbeitete Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [SCH01] Schaschek, K.; Christel, R.; Hahn, O.; Ohlhauser, S.; Rommel, R.: The Effect of Printing Blankets on the Rolling Condition of Printing Cylinders. Taga Proceedings, S. 211-223, 2001.
- [SCH05] Schaschek, K.: Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Drucktüchern. 8. Bahnlaufseminar – Papiereigenschaften, Bahnspannung, Hauptkriterien für Bahnlaufqualität, TU Chemnitz, September 2005.
- [SCH06] Schäfer, M.: Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [SCH72] Schläpfer, K.; Fässler, K.; Friez, H.: Gummitücher – Marktübersicht und Bedeutung einiger Eigenschaften. UGRA-Auftrag 63/1, 1972.
- [SHL05] Schlebusch, R.: Theorie und Numerik einer oberflächenorientierten Schalenformulierung. Berichte des Instituts für Mechanik und Flächen-tragwerke, Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, 2005.
- [SHR05] Schrod , M.; Benderoth, G.; Kühhorn, A.; Silber, G.: Hyperelastic Description of Polymer Soft Foams at Finite Deformations. Technische Mechanik, Band 25, Heft 3-4, S. 162– 173, 2005.
- [SHÜ05] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [SOO80] Soong, T.-C.; Li, C.: The steady rolling contact of two elastic layer bonded cylinders with a sheet in the nip. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 23, S. 263-273, 1980.
- [SOO81] Soong, T.-C.; Li, C.: The Rolling Contact of Two Elastic-Layer-Covered Cylinders Driving a Loaded Sheet in the Nip. Journal of Applied Mechanical, Vol. 48, S. 889-894, 1981.
- [STO86] Storåkers, B.: On Material Representation and Constitutive Branching in Finite Compressible Elasticity. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 34, Nr. 2, S. 125–145, 1986.



- 
- [TES95] Teschner, H.: Offsetdrucktechnik. 9. Auflage, Fellbach: Fachschriften-Verlag, 1995.
- [TRO06] Tropea, C.: Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) – Grundlagen und Auslegung. Vorlesungsskript, Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik, Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [TWI86] Twizell, E. H.; Ogden, R. W.: Non-linear Optimization of the Material Constants in Ogden's Stress-Deformation Function for Incompressible Isotropic Elastomers. *Journal of the Australian Mathematical Society, Series B* 24, S. 424–434, 1986.
- [WAD02] Wadle, H.; Blum, D.: Einführung in die Rastertechnologie. Heidelberger Druckmaschinen AG, 2001.
- [WAL91] Walenski, W.: Offsetdruck – Maschinen Verfahrenstechniken Produktionsmittel. Frankfurt am Main: Polygraph Verlag, 1991.
- [WRI01] Wriggers, P.: Nichtlineare Finite-Element-Methoden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.

**DIN-Normen**

- DIN 16621 Drucktechnik; Drucktücher für den indirekten Flachdruck (Offsetdruck); Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 1991.
- DIN 4768 Ermittlung der Rauheitskenngrößen  $R_{(Index)a}$ ,  $R_{(Index)z}$ ,  $R_{(Index)max}$  mit elektrischen Tastschnittgeräten; Begriffe, Messbedingungen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 1990.
- DIN 53354 Prüfung von Kunstleder; Zugversuch. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 1991.
- DIN EN ISO 1924-2 Papier und Pappe - Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung - Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min). DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN ISO 1817 Elastomere - Bestimmung des Verhaltens gegenüber Flüssigkeiten. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- DIN ISO 23529 Elastomere - Allgemeine Bedingungen für die Vorbereitung und Konditionierung von Prüfkörpern für physikalische Prüfverfahren. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN ISO 48 Elastomere und thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Härte (Härte zwischen 10 IRHD und 100 IRHD). DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 2003.

**Wissenschaftliche Einrichtungen**

- AiF            Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V.  
<http://www.aif.de>
- BVDM        Bundesverband Druck und Medien e.V.  
<http://www.bvdm-online.de>
- FOGRA       Forschungsgesellschaft Druck e.V.  
<http://www.fogra.org>
- IAIRIGAI    International Association of Research Organisations for the Information, Media and Graphic Arts Industries  
<http://www.iarigai.com>
- IDD          Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren an der Technischen Universität Darmstadt.  
<http://www.idd.tu-darmstadt.de>
- IFRA        Internationaler Verband von Unternehmen der Zeitungs- und Medienbranche  
<http://www.ifra.de>
- TAGA        The Technical Association of the Graphic Arts  
<http://www.taga.org>
- UGRA        Verein zur Förderung wissenschaftlicher Untersuchungen in der Grafischen Industrie  
<http://www.ugra.ch>

**Internetadressen ausgewählter Drucktuchhersteller**

ContiTech Elastomer-Beschichtungen GmbH, Northeim

<http://www.contiair.de>

MacDermid (eh. Rollin), Cernay

<http://www.macdermid.com/>

Meiji Rubber & Chemical, Tokyo

<http://www.meiji-rubber.co.jp/english>

Phoenix Xtra Print GmbH, Hamburg

<http://www.pxp.de>

Reeves, Spartanburg

<http://www.reevesbrothers.com>

## 11 Anhang

### 11.1 Geometrische und mechanische Eigenschaften von Drucktüchern (Herstellerangaben)

(Für das Drucktuch FSR TR lag kein Datenblatt vor.)

Farbe	SAPPHIRE blau
Markierung	Brauner Kennfaden in Laufrichtung, PHOENIX Stempel mit Artikel- und Seriennummer
Dicke	Art. 364: 1,70 mm (3 Gewebeschichten) Art. 366: 1,96 mm (4 Gewebeschichten)
Dehnung 1000 N/50 mm	<1,3 %
Kompressibilität 135 N/cm <sup>2</sup>	ca. 9 %
Reißkraft	> 4 500 N/50 mm
Dickenabnahme durch Anspannen und Setzen	< 1,3 %
Härte	ca. 78 Shore A
Rauigkeit	(Rz) 2 - 3 µm

**Tabelle 11.1:** Technische Daten zum Drucktuch Sapphire (Quelle: Broschüre der Firma Phoenix Xtra Print)

Farbe	Grau
Markierung	Brauner Kennfaden in Laufrichtung, PHOENIX Stempel mit Artikel- und Seriennummer
Dicke	Art. 301: 1,96 mm (4 Gewebeschichten)
Dehnung 1000 N/50 mm	<1,5 %
Reißkraft	> 4000 N/50 mm
Dickenabnahme durch Anspannen und Setzen	< 1,3 %
Härte	ca. 78 Shore A
Rauigkeit	(Rz) 2 - 3 µm

**Tabelle 11.2:** Technische Daten zum Drucktuch Opal (Quelle: Broschüre der Firma Phoenix Xtra Print)

## 11.2 Quasistatische Materialkennwerte für die Abrollsimulation

### 11.2.1 Gewebeschichten

	FSR TR	Sapphire	Opal
$E_{0^\circ}$ [MPa]	2240	1500	1990
$E_{45^\circ}$ [MPa]	45	15	18
$E_{90^\circ}$ [MPa]	38	20	17
G (abgeschätzt)	16 MPa $\pm$ 12 %	4,6 MPa $\pm$ 6 %	6,1 MPa $\pm$ 7 %
$\nu$ (angenommen)	0	0	0

**Tabelle 11.3:** Linearisierte elastische Konstanten für die Gewebeschichten.

### 11.2.2 Luftpolsterschichten

FSR TR				Sapphire		
i	$\mu_i$ [MPa]	$\alpha_i$	$\beta_i$ (angenommen)	$\mu_i$ [MPa]	$\alpha_i$	$\beta_i$ (angenommen)
1	-2653,77	3,727	0	-148,96	3,999	0
2	1322,61	4,045	0	74,16	4,561	0
3	1333,46	3,426	0	76,15	3,487	0

**Tabelle 11.4:** Materialparameter für die schaumelastische Luftpolsterschicht. Grad der Verzerrungsenergiefunktion  $N = 3$ .

### 11.2.3 Deckschichten

	FSR TR	Sapphire	Opal
E [MPa] (angenommen)	4,5	2,7	4,7
$\nu$ (angenommen)	0,5	0,5	0,5

**Tabelle 11.5:** Linearisierte elastische Konstanten für die isotropen Deckschichten bei den Luftpolsterdrucktüchern.

Opal		
$C_{01}^*$ [MPa]	$C_{10}^*$ [MPa]	$D_1^*$ (angenommen)
2,36485070	5,58401687	0

**Tabelle 11.6:** Materialparameter für die hyperelastische Deckschicht. Verzerrungsenergiefunktion nach Mooney-Rivlin.

### 11.3 Ermittlung der Dehnsteifigkeiten beim homogenisierten Rebar-Modell

#### 11.3.1 Reduzierte Steifigkeiten $Q_{ij}$ einzelner Schichten

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - (\nu_{12})^2 \frac{E_2}{E_1}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - (\nu_{12})^2 \frac{E_2}{E_1}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - (\nu_{12})^2 \frac{E_2}{E_1}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

#### 11.3.2 Dehnsteifigkeiten $A_{ij}$ des gesamten Drucktuchaufbaus

$$A_{11} = \sum_{\text{Alle Schichten}} Q_{11, \text{Schicht}} t_{\text{Schicht}}$$

$$A_{12} = \sum_{\text{Alle Schichten}} Q_{12, \text{Schicht}} t_{\text{Schicht}}$$

$$A_{22} = \sum_{\text{Alle Schichten}} Q_{22, \text{Schicht}} t_{\text{Schicht}}$$

$$A_{66} = \sum_{\text{Alle Schichten}} Q_{66, \text{Schicht}} t_{\text{Schicht}}$$

#### 11.3.3 Querdehnzahlen $\nu_{12}$ und $\nu_{13}$ und Schubmodul $G_{12}$ des gesamten Drucktuchaufbaus

$$\nu_{12, \text{Drucktuch}} = - \frac{A_{12}}{A_{22}}$$

$$\nu_{13, \text{Drucktuch}} = \left(1 - \nu_{12, \text{Drucktuch}}\right) \frac{1}{t_{\text{Drucktuch}}} \sum_{\text{Alle Schichten}} \left( \frac{\nu_{\text{trans}}}{1 - \nu_{\text{trans}}} \right)_{\text{Schicht}} t_{\text{Schicht}}$$

$$G_{12, \text{Drucktuch}} = \frac{1}{t_{\text{Drucktuch}}} A_{66}$$

Verfahren zur Ermittlung der restlichen Querdehnzahl und Schubmoduln sind im Abschnitt 5.6 beschrieben.

FST TR				
	Festigkeitsgewebe	Luftpolsterschicht	Stabilisierungsschicht	Deckschicht
$E_1$ [MPa]	2240	4,5	2240	4,5
$E_2$ [MPa]	38	4,5	38	4,5
$\nu_{12}$ [-]	0	0	0	0,5
$G_{12}$ [MPa]	16	2,25	16	1,5
$t$ [mm]	0,57	0,6	0,4	0,4
$\nu_{trans}$ [-]	0	0	0	0,5
$Q_{11}$ [MPa]	2240	4,5	2240	6
$Q_{12}$ [MPa]	0	0	0	3
$Q_{22}$ [MPa]	38	4,5	38	6
$Q_{66}$ [MPa]	16	2,25	16	1,5
Gesamtes Drucktuch:				
$A_{11}$ [N/mm]	2177,9			
$A_{12}$ [N/mm]	1,2			
$A_{22}$ [N/mm]	41,96			
$A_{66}$ [N/mm]	17,47			
$\nu_{12}$ [-]	0,028			
$G_{12}$ [MPa]	8,86			
$\nu_{13}$ [-]	0,197			

**Tabelle 11.7:** Quasistatische, linearisierte, elastische Kennwerte und daraus abgeleitete Dehnsteifigkeiten zum Drucktuch FSR TR.



Sapphire				
	Festigkeitsgewebe	Luftpolsterschicht	Stabilisierungsschicht	Deckschicht
$E_1$ [MPa]	1500	2,7	1500	2,7
$E_2$ [MPa]	20	2,7	20	2,7
$\nu_{12}$ [-]	0	0	0	0,5
$G_{12}$ [MPa]	4,6	1,35	4,6	0,9
$t$ [mm]	1,07	0,25	0,3	0,35
$\nu_{\text{trans}}$ [-]	0	0	0	0,5
$Q_{11}$ [MPa]	1500	2,7	1500	3,6
$Q_{12}$ [MPa]	0	0	0	1,8
$Q_{22}$ [MPa]	20	2,7	20	3,6
$Q_{66}$ [MPa]	4,6	1,35	4,6	0,9
Gesamtes Drucktuch:				
$A_{11}$ [N/mm]	2056,935			
$A_{12}$ [N/mm]	0,63			
$A_{22}$ [N/mm]	29,335			
$A_{66}$ [N/mm]	6,9545			
$\nu_{12}$ [-]	0,021			
$G_{12}$ [MPa]	3,53			
$\nu_{13}$ [-]	0,173			

**Tabelle 11.8:** Quasistatische, linearisierte, elastische Kennwerte und daraus abgeleitete Dehnsteifigkeiten zum Drucktuch Sapphire.

Opal				
	Festigkeitsgewebe	Luftpolsterschicht	Stabilisierungsschicht	Deckschicht
$E_1$ [MPa]	1990			4,7
$E_2$ [MPa]	18			4,7
$\nu_{12}$ [-]	0			0,5
$G_{12}$ [MPa]	6,1			1,56
$t$ [mm]	1,27			0,7
$\nu_{\text{trans}}$ [-]	0			0,5
$Q_{11}$ [MPa]	1990			6,26
$Q_{12}$ [MPa]	0			3,13
$Q_{22}$ [MPa]	18			6,26
$Q_{66}$ [MPa]	6,1			1,56
Gesamtes Drucktuch:				
$A_{11}$ [N/mm]	2531,686667			
$A_{12}$ [N/mm]	2,193333333			
$A_{22}$ [N/mm]	27,24666667			
$A_{66}$ [N/mm]	8,843666667			
$\nu_{12}$ [-]	0,080			
$G_{12}$ [MPa]	4,48			
$\nu_{13}$ [-]	0,326			

**Tabelle 11.9:** Quasistatische, linearisierte, elastische Kennwerte und daraus abgeleitete Dehnsteifigkeiten zum Drucktuch Opal.

**11.4 Wesentliche Merkmale und Materialparameter zum Rebar-Modell**

	Festigkeitsgewebe	Luftpolster-schicht	Stabilisie-rungsgewebe	Deckschicht	Gesamtes Drucktuch
E <sub>1</sub>	Linear. Ermittelt aus dem Zugversuch am gesamten Drucktuch in Kettrichtung. FE-Modellierung mithilfe von Rebar-Flächenelementen	Isotrop. Schaumelastisch. Verzerungsenergiefunktion wurde auf Basis der experimentellen Federkennlinie approximiert. FE-Modellierung mithilfe von Solid-Elementen	Annahme: Gleiche elastische Eigenschaften wie das Festigkeitsgewebe	Isotrop. Linear. Annahme: der E-Modul entspricht dem Anfangs-E-Modul der Luftpolster-schicht. FE-Modellierung mithilfe von Solid-Elementen	Linear. Ermittelt durch Zugversuch. E <sub>1</sub> wurde als Gewebeeigenschaft betrachtet
E <sub>2</sub>	Analog E <sub>1</sub> , jedoch in Schuss-Richtung				Analog E <sub>1</sub> , jedoch in Schuss-Richtung
E <sub>3</sub>	Annahme: Gewebe ist starr in Dickenrichtung				Nichtlinear. Ermittelt durch Stempelversuch. E <sub>3</sub> wurde als Elastomereigenschaft betrachtet
v <sub>12</sub>	Annahme: 0	Annahme: 0		Annahme: 0,5	Kann aus den Querdehnraten und den Schubmoduli einzelner Schichten errechnet werden
v <sub>13</sub>	Annahme				
v <sub>23</sub>	v <sub>trans</sub> = 0				
G <sub>12</sub>	Bei den Rebar-Flächenelementen nicht definiert. Kann jedoch abgeschätzt werden	Errechnet aus E und v	Errechnet aus E und v		
G <sub>13</sub>	Annahme: Gewebe ist schubstarr in den Transversalebene				
G <sub>23</sub>					

**Tabelle 11.10:** Wesentliche Merkmale und Materialparameter zum Rebar-Modells

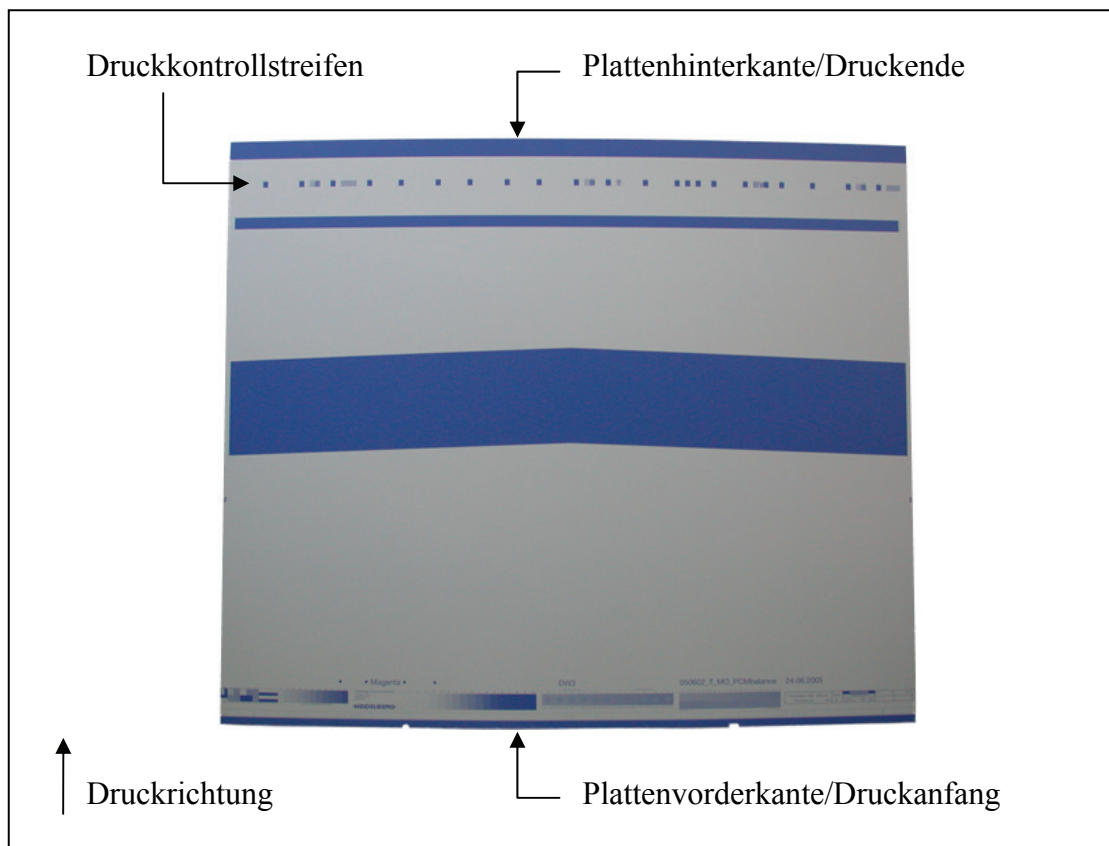
### 11.5 Typische Prozessparameter für Feucht- und Farbwerkjustage

<b>Versuchsdatum</b>	: Fr., 26. Mai 2006
<b>Uhrzeit</b>	: 17 Uhr
<b>Raumtemperatur</b>	: 22 °C
<b>Rel. Luftfeuchte</b>	: 45 %
<b>Druckmaschine</b>	: MOZ-P, Baujahr 1980er
<b>Druckwerk</b>	: Nr. 1
<b>Maschinensteuerung</b>	: CPC 1 (Fernsteuerung von Farbe und Register)
<b>Feuchtwerk</b>	: Alcolor
<b>Druckplatte</b>	: Justage-Platte, Magenta (wegen der für Versuchszweck geeigneten 45°-Winkelung, es wird allerdings mit Cyan gedruckt)
<b>Drucktuch</b>	: Litho/Conti, kompressibel, Dicke 1,95 mm
<b>Druckfarbe</b>	: Cyan Topset-Serie/Epple
<b>Papier</b>	: LumiArt/Stora, 135 g/cm <sup>2</sup> , Dicke 0,095 mm, Format 48 x 65 cm
<b>Feuchtwasserzufuhr</b>	: 64 %
<b>Farbduktorhub</b>	: 38 %
<b>Verreibereinstellung</b>	: Entspricht der Grundeinstellung der Maschine (Einstellung ab Werk), d.h., maximale Verreibung (äußerer Ring 30), Umkehrzeitpunkt weiße 1
<b>Farbauftragwalzen</b>	: 4 nichttraversierende Walzen
<b>Farbzoneneinstellung</b>	: Alle Farbzonen gleich geöffnet, bis auf die Randzonen 1 und 20, die etwas tiefer eingestellt wurden
<b>Alkoholgehalt im Feuchtwasser</b>	: 10 % (Alkoholmessgerät Alcoprint 3000, Unisensor Sensorsysteme GmbH)
<b>PH-Wert des Feuchtwassers</b>	: 4,7...5,0
<b>Feuchtwasserhärte</b>	: ca. 18 dH
<b>Erzielte Farbdichte</b>	: 1,8

<b>Druckabwicklung</b>	: Überstand Druckplatte +0,15 mm $\Rightarrow$ Pressung 0,1 mm Überstand Drucktuch -0,05 mm Papierpressung 0,15 mm
<b>Druckgeschwindigkeit</b>	: 8000 B/h
<b>Druckreihenfolge</b>	: 200 Vorlaufbogen, danach nahtlos 10 Versuchsbogen zum Auswerten
<b>Farbdichtemessung</b>	: 3 Tage nach dem Drucken mit Densitometer Vipdens C9

**Tabelle 11.11:** Prozessparameter für Feucht- und Farbwerkjustage

## 11.6 Justage-Druckplatte

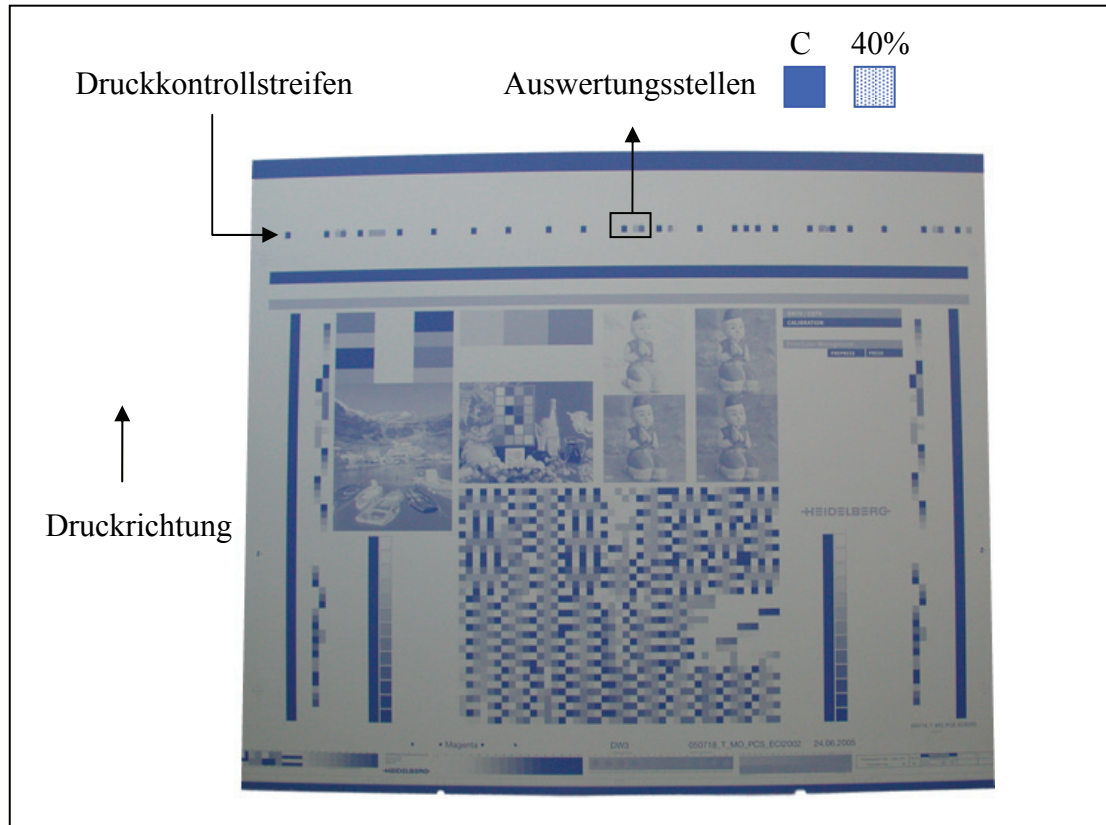


**Abbildung 11.1:** Druckplatte zur Feucht- und Farbwerk-Justage (Heidelberger Druckmaschinen AG)

Die Justage-Druckplatte besteht aus einem breiten Querbalken, der bei gleich geöffneten Farbzonenschrauben eine über die Bogenbreite gleichmäßige Farbabnahme ermöglicht. Bei korrekt justiertem Farb- und Feuchtwerk wird am Druckkontrollstreifen eine

konstante Farbdichte gemessen. Aufeinander folgende Bogen dürfen sich außerdem in der Farbdichte nicht um mehr als 0,1 unterscheiden.

### 11.7 Testdruckform



**Abbildung 11.2:** Testdruckform (Heidelberger Druckmaschinen AG)

Die Testdruckform besteht aus zahlreichen Elementen, die durch ihren Gehalt an druckenden und nichtdruckenden Anteilen und ihre Anordnung auf der Druckplatte für eine gute, gleichmäßige Farbführung sorgen. Im Druckversuch wird an einem auf dem Druckkontrollstreifen mittig angeordneten Vollton- bzw. 40%-Rastertonfeld ausgewertet.

## 11.8 Rasterpunktvermessung mit der Software Matlab

### 11.8.1 Algorithmus

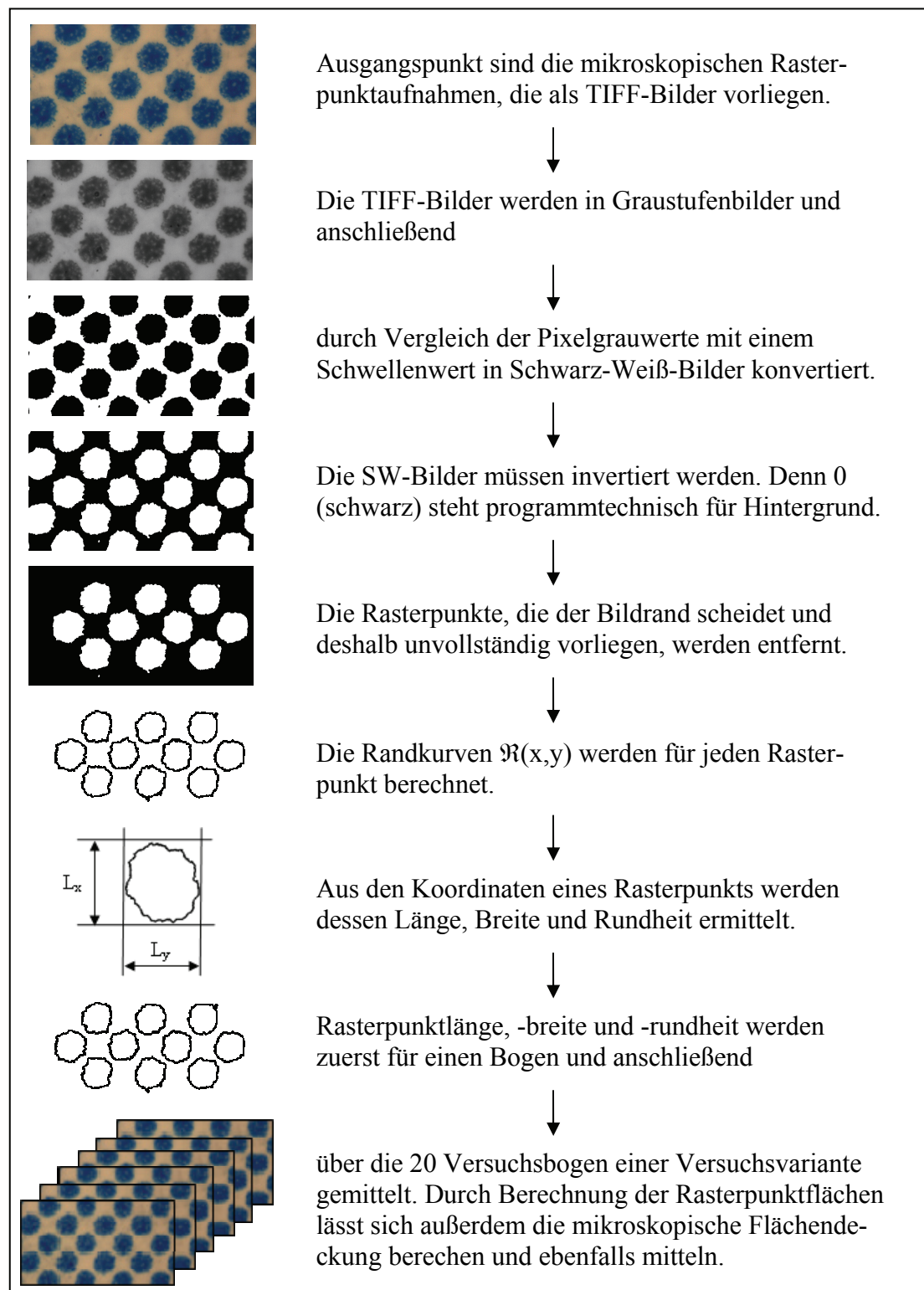


Abbildung 11.3: Algorithmus zur Rasterpunktvermessung

### 11.8.2 Quellcode

```
% Druckversuch
% Mikroskopische Auswertung
% Programm zur Rasterpunktvermessung

% Definiere Konstanten
% Anzahl der Versuchsvarianten
Anzahl_Versuchsvarianten = 27;
% Bildauflösung 668x1260 Pixel. Sie bleibt für alle mikroskopischen
% Aufnahmen die gleiche.
Aufloesung_x = 668;
Aufloesung_y = 1260;
% Definiere ein Band von 2 Pixel, um festzustellen, ob ein
% Rasterpunkt auf dem Bildrand liegt.
Aufloesung_epsilon = 2;

% Definiere kleinste und größte Rasterpunktabmessungen, um kleine
% Farbflecken zu erkennen bzw. zwei zusammenschmelzende Rasterpunkte
% nicht bei der Auswertung einzubeziehen.
Minimale_Punktlaenge = 90;
Maximale_Punktlaenge = 200;
Minimale_Punktbreite = 90;
Maximale_Punktbreite = 200;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      Anzahl Versuchsbogen pro Versuchsvariante      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% In der Regel gibt es 20 Versuchsbogen je Versuchsvariante.
% Die mikroskopische Aufnahmen (TIFF-Bilder) sind zusammen in
% einem Verzeichnis \Input\ gespeichert und tragen einen Name mit
% einheitlicher Struktur: „40pz-Hintenmitte-j-k.tif“.
% Dabei bezeichnet j die Versuchsvariantennummer (1...27) und
% k die Bogennummer (1...20)
% In diesem (optionalen) Programmabschnitt wird jedoch festgestellt,
```



```
% wie viele Bilder von jeder Versuchsvariante tatsächlich
% vorhanden sind.

% Iteriere über alle Versuchsvarianten. Zählvariable: w
for w=1:Anzahl_Versuchsvarianten
% transformiere die Zählvariable in ein String für Namenbildung
w_str=int2str(w);

% Bilde den Bilddateinamen und fange gleich mit dem ersten Bogen an
dateiname_input=sprintf('%s','\Input\40pz-Hintenmitte-',w_str,'-', '1', '.tif');

% Öffne die Bilddatei „40pz-Hintenmitte-w-1.tif“
% fid ist eine return-Variable. Wenn die Datei existiert ist sie
% gleich -1.
fid = fopen(dateiname_input);

% Zähle nun, wie viele Bogen bei der Versuchsvariante tatsächlich
% ausgewertet wurden, und fange zunächst mit Anzahl 0 an.
zaehler = 0;

% Wenn die Bilddatei existiert dann inkrementiere die Variable
% „zaehler“ um 1
while fid ~= -1
% Hier werden die tatsächlich ausgewerteten Bogen einer
% Versuchsvariante gezählt
Anzahl_Exemplare(w) = zaehler;
zaehler = zaehler + 1;
zaehler_str=int2str(zaehler);

% Danach schreite zur nächsten Bilddatei fort.
dateiname_input=sprintf('%s','\Input\40pz-Hintenmitte-', w_str, '-', zaehler_str, '.tif');
fid = fopen(dateiname_input);

% Schließe die geöffneten Bilddateien
fclose all ;
end
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%% Ende Programmabschnitt %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%                                Rasterpunktberechnung                                %
```

```
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Es werden jeweils die Versuchsabschnitte ausgewertet, für die
% mikroskopische Bilder im Verzeichnis \Input\ tatsächlich
% vorhanden sind. Für diese wird die Zählvariable w_eff verwendet.
% Iteriere über die Versuchsvarianten
```

```
w_eff = 1;
```

```
for w=1:Anzahl_Versuchsvarianten
```

```
% Nur wenn für eine Versuchsvariante Bilder vorhanden sind
% (Anzahl der Exemplare  $\neq 0$ ) werden Rasterpunkte berechnet
if (Anzahl_Exemplare(w)~=0)
```

```
% Konvertiere Zählvariable in String, um Dateinamen zu bilden
w_str=int2str(w)
```

```
% Die Variable c wird kumulativ gebildet. Sie ermittelt die Anzahl
% der Rasterpunkte auf alle Versuchsbogen einer Versuchsvariante
% (in der Regel 20 Bogen)
% Initialisiere die Variable c
c=1;
```

```
% Für Datenausgabe werden die Nummer der Versuchsvarianten, für die
% Rasterpunkte berechnet werden, in ein Feld gespeichert
Versuchsnummer(w_eff) = w;
```

```
% Iteriere nun über alle Versuchsbogen einer Versuchsvariante
for z=1:Anzahl_Exemplare(w)
```

```
% Konvertiere Zählvariable in String, um Dateinamen zu bilden
z_str = int2str(z);
```

```
% Bilde den Namen der Bilddatei, die geöffnet werden soll
dateiname_input=sprintf('%s','Input\40pz-Hintenmitte-', w_str, '-', z_str, '.tif');

% Lese das RGB-Bild aus der Mikroskopie ein
RGB = imread(dateiname_input);

% Konvertiere das RGB- in ein Graustufenbild.
I = rgb2gray(RGB);

%Konvertiere das Graustufen- in ein Schwarz-Weis-Bild
threshold = graythresh(I);
bw = im2bw(I,threshold);

% Invertiere das sw-Bild, sodass Schwarz für den Hintergrund
% (nicht bedruckten Bereich) steht.
bw=~bw;

% Eliminiere kleine Flecken, die möglicherweise in einem Rasterpunkt
% enthalten sind
bw = bwareaopen(bw,30);
se = strel('disk',2,8);
bw = imclose(bw,se);
bw = imfill(bw,'holes');

% Berechne die Koordinaten der Randkurven aller im geöffneten Bild
% enthaltenen Rasterpunkte und speichere sie in das Feld B
[B,L] = bwboundaries(bw);

% Variable zur Ermittlung der geometrischen Eigenschaften der auf dem
% Bild befindlichen Rasterpunkte
stats = regionprops(L,'Area','Centroid');

% length(B) gibt die Anzahl der Rasterpunkte an, die auf einem Bild
% identifiziert werden konnten. Berechne nun sequentiell die
% identifizierten Rasterpunkte (Zählervariable: k)
for k = 1:length(B)
```

% Ermittle die (x,y)-Koordinaten der Randkurve des Rasterpunkts k

**boundary = B{k};**

% Ermittle die Länge des Randkurve k

**delta\_sq = diff(boundary).^2;**

**perimeter = sum(sqrt(sum(delta\_sq,2)));**

% Ermittle die Fläche des Rasterpunkts k und speichere sie in das

% Feld Area\_Tab

**area = stats(k).Area;**

**Area\_Tab(k) = area;**

% Berechne die Rundheit des Rasterpunkts k aus dessen Umfang

% und Fläche

**metric = 4\*pi\*area/perimeter^2;**

% Teile die (x,y)-Koordinaten der Randkurve k

% in zwei Spaltenvektoren auf.

**x=boundary(:,1);**

**y=boundary(:,2);**

% Nun iteriere über die x- bzw. y-Koordinaten der Randkurve k

% und überprüfe, ob diese den Bildrand schneidet, d. h., ob die Werte

% von x bzw. y gleich Null oder gleich der Bildlänge bzw. -breite

% sind (abzüglich der Toleranz Auflösung\_epsilon).

%

% Es wird zuerst angenommen, der Rasterpunkt schneide den Bildrand

% nicht.

**Schneidet = 0;**

% Iteriere über alle Punkte der Randkurve k

**for cc = 1:length(x)**

% Prüfe anhand der Koordinaten x und y, ob die Randkurve

% das Bildrand schneidet

**if ((x(cc)<=Auflösung\_epsilon) ||**

**(x(cc)>=Auflösung\_x-Auflösung\_epsilon) ||**

```

(y(cc)<=Aufloesung_epsilon) ||
(y(cc)>=Aufloesung_y-Aufloesung_epsilon))

% Wenn ja, setze die Variable „Schneidet“ auf 1
Schneidet=1;

% Ende der Iteration über die Punkte der Randkurve k
end;
end;

% Berechne nun die Länge und Breite des Rasterpunkts k
Lx_check=abs(max(x)-min(x));
Ly_check=abs(max(y)-min(y));

% Wenn der Rasterpunkt die Randkurve nicht schneidet (liegt
% also vollständig auf dem Bild) und seine Abmessungen
% in der definierten Größenordnung liegen (d. h., es handelt
% sich nicht um kleine Farbflecken oder zusammengeschmolzene
% Rasterpunkte), dann nehme die ermittelte Rasterpunktlänge, –breite,
% Formfaktor und Rundheit in entsprechende Felder auf.
if ( (Schneidet==0) && (Lx_check>Minimale_Punktlaenge) &&
(Lx_check<Maximale_Punktlaenge) && (Ly_check>Minimale_Punktbreite) &&
(Ly_check<Maximale_Punktbreite) )

Lx(c) = Lx_check;
Ly(c) = Ly_check;
Formfaktor(c) = Lx(c)/Ly(c);
Rundheit(c)=metric;

% Die Rasterpunktlänge, –breite, Formfaktor und Rundheit bei einer
% Versuchsvariante (ca. 200 Punkte) werden in einem entsprechend
% großen Feld gespeichert.
% Inkrementiere den Rasterpunktzähler für den nächsten Versuchsbogen
c = c + 1;

% Ende der Iteration über die Rasterpunkte eines Versuchsbogens
end;

```

```

end;

% Berechne die Flächendeckung auf einem Versuchsbogen
Rastertonwert(z)=100*(sum(Area_Tab)/(Aufloesung_x*Aufloesung_y));

% Speichere das SW-Bild in eine Datei im Verzeichnis \Output\
dateiname_ouput=sprintf('%s','\Output\output_40pz-Hintenmitte-', w_str, '-', z_str,
'tif');
imwrite(bw,dateiname_ouput,'tif');

% Lösche die Hilfsvariablen
clear Area_Tab x y boundary delta_sq metric perimeter se stats area;

% Ende der Iteration über alle Versuchsbogen einer Versuchsvariante
end;

% Berechne nun Mittelwerte und Standardabweichung für
% Rasterpunktlänge, -breite, Rundheit, Formfaktor und Flächendeckung
Lx_mittel(w_eff) = mean(Lx);
Ly_mittel(w_eff) = mean(Ly);
Standard_Abw_Lx(w_eff) = std(Lx);
Standard_Abw_Ly(w_eff) = std(Ly);
Rastertonwert_mittel(w_eff) = mean(Rastertonwert);
Standard_Abw_Rastertonwert(w_eff) = std(Rastertonwert);
Formfaktor_mittel(w_eff) = mean(Formfaktor);
Standard_Abw_Formfaktor(w_eff) = std(Formfaktor);
Rundheit_mittel(w_eff) = mean(Rundheit);
Standard_Abw_Rundheit(w_eff) = std(Rundheit);

% Fasse alle statistischen Werte in ein Feld zusammen, um sie
% tabellarisch auszugeben.
Zusammen_mittel = [Versuchsnummer', Lx_mittel', Standard_Abw_Lx', Ly_mittel',
Standard_Abw_Ly', Formfaktor_mittel', Standard_Abw_Formfaktor', Rundheit_mittel',
Standard_Abw_Rundheit', Rastertonwert_mittel', Standard_Abw_Rastertonwert'];

% Speichere die Ergebnisse in eine Textdatei
dateiname_output=sprintf('%s','\Output\Report_mittel.rpt');

```

```
save(dateiname_output, 'Zusammen_mittel', '-ascii', '-tabs');
```

```
% Inkrementiere für die nächste Versuchsvariante
```

```
w_eff = w_eff + 1;
```

```
% Lösche die Hilfsvariablen
```

```
clear B I Lx Ly Formfaktor Rundheit Rastertonwert;
```

```
% Ende Iteration über Versuchsvarianten
```

```
end;
```

```
end;
```

```
%%%%%%%%%%%%%% Ende Programmabschnitt %%%%%%%%%%%%%%%
```





**Lebenslauf****Persönliche Daten**

Name	Aous Bouabid
Geburtsdatum	2. April 1976
Geburtsort	Sousse, Tunesien
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	tunesisch

**Ausbildung**

1981 - 1994	Schule, Sousse, Tunesien
1995 - 2000	Universität Kaiserslautern, Maschinenbaustudium, Diplom

**Berufspraxis**

2000 - 2002	Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, wissenschaftlicher Mitarbeiter
2003 - 2007	Fachgebiet Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Seit 2008	Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität Erlangen-Nürnberg, wissenschaftlicher Mitarbeiter